МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Отделения электронной инженерии _____М.В.Тригуб «___»____2022 г.

Лабораторная работа №4

Расчёт амплитудно-частотных характеристик микромеханического гироскопа с помощью конечно-элементного моделирования

Методические указания по выполнению лабораторной работы по курсу «Сенсорные и актюаторные элементы микросистемной техники» для студентов IV курса, обучающихся по образовательной программе направления 11.03.04 – Электроника и наноэлектроника

Томск – 2022

Цель лабораторной работы

Научиться строить амплитудно-частотные характеристики микромеханических инерциальных сенсоров с помощью метода конечных элементов, а также определять их чувствительность.

Введение

В лабораторной работе будет рассматриваться однокомпонентный микромеханический гироскоп (ММГ) LL-типа, представленный на рисунке 1.



Рисунок 1 – 3D-модель однокомпонентного ММГ LL-типа

Инерционная масса (ИМ) 1 с помощью упругих подвесов крепится к неподвижному основанию. Первичные колебания создаются гребенчатыми структурами (ГС) 2 вдоль оси Ү. При возникновении угловой скорости ω вокруг оси Z возникает сила Кориолиса, которая заставляет перемещаться ИМ 1 вдоль оси X при этом изменяется ёмкость чувствительных ГС 4.

Собственные формы колебаний ММГ представлены на рисунке 2.



Ход работы.

1⁰. Запустите программу Ansys Workbench 2020 R2. Если Вы находитесь в учебном классе, то тогда запустите программу с компьютера. Если Вы работаете удалённо, то запуск программы осуществляется через vap.tpu.ru. Значок для запуска программы находится в папке САЕ. У Вас может не быть доступа к онлайн запуску программы ANSYS Workbench.

2⁰. После запуска программы откроется окно программы ANSYS Workbench, рисунок 3.



Рисунок 3 – Главное окно программы ANSYS Workbench

Под цифрой 1 в главном окне располагается Toolbox. В этом месте представлены основные и вспомогательные модули для проведения различных типов анализа. Под цифрой 2 обозначено главное окно для создания схемы анализа (Project Schematic).

 3^{0} . На следующем этапе необходимо экспортировать 3D модель микромеханического гироскопа в программу ANSYS Workbench. Для этого в Toolbox раскройте список Component Systems. Зажмите левую кнопку мыши (ЛКМ) на компоненте Geometry и перетащите его в окно Project Schematic, рисунок 4.



Рисунок 4 – Создание компонента Geometry

Нажмите правой кнопкой мыши на второй строчке компонента Geometry и выберите пункт New SpaceClaim Geometry, рисунок 5.



Рисунок 5 – Создание геометрии для анализа

4⁰. В окне открывшейся программы SpaceClaim Нажмите File → Open. В открывшемся окне сначала выберите формат открываемого файла (Parasolid). Затем выберите файл и нажмите кнопку Открыть, рисунок 6.

Упорядочить 👻 Создать паг	аку				• 🔳 😮
🔮 Документы \land 🔲 🛛	Амм	Дата изменения	Тип	Размер	
🕂 Загрузки	MMG.x_t 2	21.03.2022 20:42	Файл "Х_Т"	3 936 КБ	
Изображения					
Рабочий стол					
👝 Локальный дис					
Profiles (D:)					
Accreditation (K [*])	Improve imported data	Options			
	Check Geometry				
Имя файла:	MMG.x_t		~	Parasolid (*.x_t;*.xr	mt_txt;*.x_b;*. ~
				Открыть	Отмена

Рисунок 6 – Открытие 3D модели

После этого 3D модель микромеханического гироскопа откроется в программе SpaceClaim, рисунок 7.



Рисунок 7 – 3D модель ММГ

Под цифрой 1 в программе SpaceClaim обозначена структура 3D модели (Дерево построения). Под цифрой 2 обозначено рабочее окно для взаимодействия с 3D моделью.

5⁰. Определение размеров гребенчатых структур для расчёта их емкостей.

Перейдите на вкладку Measure и выберите инструмент Measure, рисунок 8.

sc 📂	<mark>.</mark> ຳ -	୯' - ⇒				,	A:Geometry	y - Geom -	SpaceClai	im				-	□ ×
File	Sketch	Design	Display	Assembly	Measure	Facets	Repair	Prepare	Workbe	ench D	Detail	Sheet Metal	Tools	KeyShot	• 0
Home Plan V T • S Orien	View Meas	pi sure	Mass Prope Check Geor pect	nties 🚱 (metry 🌚 (Interf	Curves /olumes ierence	√ Normal √ Grid	↔ Curv ሥ Dihe	vature 🧃 edral 🤣 Quality) Draft ⊳ Stripes	Deviatio	'n				

Рисунок 8 – Запуск инструмента для измерения размеров

Для примера определим ширину гребёнки. Нажмите ЛКМ на линии, которая обозначает ширину гребёнки и после этого рядом с курсором появится размер данной линии, рисунок 9.



Рисунок 9 – Определение ширины гребёнки

 6° . После определения необходимых размеров гребенчатых структур, необходимо отключить все части геометрии, которая подсвечена красным цветом. Данная геометрия является неподвижной во время работы устройства и не будет влиять на точность расчёта. Чтобы исключить необходимую геометрию из расчёта, к примеру, в Дереве построения раскройте строчку Тело_2_3a_4 и нажмите ПКМ мыши на строчке Тело_2:4. В появившемся меню выберите пункт Suppress for Physics, рисунок 10.

🛐 📄 🖷 🤊 -	- ا ک	÷			A:Geometry - G	om - SpaceCla	iim			-	□ ×
File Sketch	Design	Display Ass	embly Measur	e Facets	Repair Pre	pare Workb	ench Detail	Sheet Metal	Tools	KeyShot	• 0
Home -	⊃	Mass Properties	Curves	💞 Normal	📣 Curvature	e 🍑 Draft					
🍵 🛛 😂 🛛 Meas	ure 🄇	Check Geometry	Volumes	🗞 Grid	Nihedral	🛷 Stripes	Deviation				
Orient	I	nspect	Interference		Qual	ity					
Structure MMG* MG* Structure MG* Teno_2 Structure Structure Structure MG* Teno_2 Teno_2 Structure Teno_1 Structure Layers Sel Options - Selection Properties Properties Style By Tessellation Quiz 5	_3a_4 _3a _3a _3a _3a _3a _3a _3a _3a _3a _3a	Detach All Suppress for Phy Move to New Co Delete Rename Lock Check Geometry Hide Others Inverse Visibility Always Visible Properties 3: 255, 175, y Style	Click an object.	Double-click	to select an e	dge loop-Trip	v Z	olid.		ANSY 2020	S 12
Properties Appearance	e	Δ	Geom ×								4 Þ 🗙
Click an object. Double	-click to	select an edge loop.	Triple-click		A A Bod	y 1	Body 🌲	🔊 🕅 - 🖽	•	₽ 🔍 • 🛩	7

Рисунок 10 – Исключение тела из расчёта

После этого, на телах, исключённых для расчёта, появятся перечёркнутые кружки, рисунок 11.



Рисунок 11 – Исключённые из расчёта тела

Самостоятельно исключите из расчёта всю геометрию, подсвеченную красным цветом.

Сохраните данную 3D модель в свою папку и вернитесь в окно Workbench.

 7^{0} . В Toolbox раскройте список Analysis Systems, зажмите ЛКМ на компоненте Modal и перетяните его на вторую строчку компонента Geometry, рисунок 12.



Рисунок 12 – Добавление компонента Modal в схему анализа

Из рисунка 12 видно, что компонент Geometry и компонент Modal связаны друг с другом. Компонент Modal необходим для определения собственных частот и форм колебаний ММГ.

Из этого же списка (Analysis Systems) перетащите 2 компонента Harmonic Response на строчку Solution компонента Modal, рисунок 13.



Рисунок 13 – Добавление компонента Harmonic Response в схему проекта

Компонент Harmonic Response позволяет проводит анализ конструкции при различных гармонических воздействиях. В нашем случае, с помощью данного компонента, будем определять амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ММГ.

8⁰. На следующем этапе необходимо задать материал, который будет использоваться при анализе.

Нажмите ПКМ на строчке Engineering Data компонента Modal и выберите строчку Edit, рисунок 14.

🚾 Unsaved Project - Workbench	_		>	×
File View Tools Units Extensions Jobs Help				
T C Project				
👔 Import 🚳 Reconnect 🔯 Refresh Project 🍠 Update Project 📲 ACT Start Page				
Toolbox • • • × Project Schematic			- д	×
Analysis Systems				^
Coupled Field Static A B	с			
Coupled Field Transient 1 🚱 Geometry 1 📴 Modal 1 🐼 Harmonic	Res ponse			
Eigenvalue Buckling 2 Geometry 🗸 2 🔮 Engineering Data 🗸 Engineering Data	o Dom	-		
i Electric Geometry 3 Geometry				
🔀 Explicit Dynamics 4 🧭 Model 🖉 🝙 Duplicate				
🛐 Fluid Flow - Blow Molding (Polyflow) 5 🍓 Setup 💡 Transfer Data From Ner	w			
🚱 Fluid Flow- Extrusion (Polyflow) 6 🙀 Solution 💡				
Image: Second secon		-		
S Fluid Flow (Fluent) Modal ✓ Update				
S Fluid Flow (Polyflow) Update Upstream Comp	onents			
B Harmonic Acoustics				
W Harmonic Response				
W Hydrodynamic Diffraction Rename Rename				
Yurnet Properties				
C Engine (Fluent)				
Magnetostatic galaxi hap				
Modal Add Note				
🔝 Modal Acoustics 💊 5 🕵 Setup		2 🖌		
📶 Random Vibration 6 🙀 Solution		2 🔺		
III Response Spectrum 7 🤿 Results		? 🖌		
Rigid Dynamics Harmonic F	Response			
SPEOS				
BI Static Acoustics				
View All / Customize <			>	×
Ø Double-click component to edit.	🟓 Shr	ow 1 Mes	sages	:

Рисунок 14 – Редактирование материала

Откроется новая вкладка для возможности редактирования инженерных данных. Нажмите на кнопку Engineering Data Sources и нажмите на кнопку с тремя точками для добавления новой библиотеки материалов, рисунок 15.

WB Unsaved Project - Workbench									_		\times
File View Tools Units Extensions	Jobs H	lelp									
💕 🗳 🖏 🚳											
🖺 📴 🛃 🖪 Project 🥥 B2,0	2,D2:Eng	ineering Data 🗙									
Y Filter Engineering Data	Sources										
Toolbox 🔒 🗸 🗸 🗸	Enginee	ring Data Sources				▼ џ	x	Table: No data		•	д X
Physical Properties		A	в	С	D		^				
E Linear Elastic	1	Data Source	1	ocation	Descri	ption					
	13	Fluid Materials			specific for	use in a					
			_	_	fluid analysi	s.					
E Custom Material Models	*	Click here to add a new library			2						
	Outlines	No data				- 0	· ·				
	Outline:	No data				- * *	ĥ				
		A		Add	Course F						
	1			Aud	pource L	Description		<			>
								Chart: No data		•	ĄХ
			_				_				
	Properti	es of Outline Row 1:				▼ ₽	×				
		A			В	С					
	1	Propert	y		Value	Unit					
View All / Customize											
Ready		An /	Job	Monitor	. 🔤 No Di	PS Connecti	on	Show Progress	C Show	v 1 Messa	des

Рисунок 15 – Добавление новой библиотеки материалов

В открывшемся окне выберите файл MST_materials и нажмите кнопку открыть, рисунок 16.

Упорядочить 👻 🤇	Создать паг	іку				- 🔳 🕐
🔮 Документы	^ Имя	a ^	`	Дата изменения	Тип	Размер
🖊 Загрузки	(e	MST_materials)	15.03.2020 18:14	Документ XML	34 KB
💽 Изображения	_					
🁌 Музыка						
📃 Рабочий стол			0			
👝 Локальный дис	3					
🛖 Profiles (D:)						
- Accreditation (K	× ۲					
ν	1мя файла:	MST_materials		~	AUTODYN Materia	Files (*.xml) $ \smallsetminus $
				2	Открыть	Отмена

Рисунок 16 – Добавление библиотеки с материалами

Выберите добавленную библиотеку MST_materials, а после этого в окне Outline of MST_Materials добавьте материал Silicon Monocrystal 100 нажав на кнопку плюс, рисунок 17.

We Unsaved Project - Workbench												_		×	
File View Tools Units Extensions	Jobs H	lelp													
■ ■	C2,D2:Eng	ineering Data 🗙													
Y Filter Engineering Data 🔛 Engineering Data	a Sources		_	_	_								_		_
Toolbox 🗸 🛧 🗙	Enginee	ring Data Sources					▼ ₽	L X	Table	e of P	Properties	Row 2: D)ens	▼ ₽	×
Field Variables		A	В	С		D		_^				A			В
Physical Properties	1	Data Source	Ϊ	_ocation	Male	Descripti	on		1		Temperat	ure (C)	🖹 D	ensity (kg n
	13	🗐 Fluid Materials			speci	fic for us	e in a		2				2	329	
Plasticity		4644			fluid a	analysis.		-							
	14	MST_materials													
	Outline	Click here to add a													
	Outline	of MST_materials					• 4								
		A	В	С	D	E									
	1	Contents of MST_materials		Add	ource	Descri	ption		<						>
	4	Silicon Monocrysta 100	-		2	Кремний	i		Char	t of F	Properties	Row 2: [Den: Tensity	▼ ₽	×
	5	🐚 SW-Y	÷		8	Стекло		~	<u>ج</u>	3,2					
	Properti	es of Outline Row 4: Silico	n Mo	nocryst	al 100		⊸ д	чx	р Б	2,7					
		A				в	С		<u> </u>						
	1	Property	(V	alue	Unit		×10	2,2	-				
	2	🔁 Density			232	29	kg m^-	-3	l ≩						
	3	Isotropic Seca	nt The	rmal					Dens	1,7					
	8	🗉 📔 Isotropic Elast	ticity			Tabular					-1 -0	.5 0	0,	5	i
View All / Customize											Τe	emperat	ture [C	:]	
Ready		Au/	Job I	Monitor.	💷	No DPS	Connec	tion		now P	rogress	😃 Shor	w 1 Mes	sages	.:

Рисунок 17 – Добавление материала Silicon Monocrystal 100

После этого нажмите на кнопку Engineering Data Sources. В окне Outline of Schematic... нажмите ПКМ на материале Silicon Monocrystal 100 и выберите пункт Default Solid Material For Model, рисунок 18.



Рисунок 18 – Назначение нового материала для 3D модели ММГ После этого вернитесь на вкладку Project.

9⁰. Настройка анализа.

Для настройки анализа нажмите ПКМ на строке Model компонента Modal и выберите строчку Edit. Откроется окно Multiple Systems – Mechanical, рисунок 19.



Рисунок 19 – Окно Multiple Systems – Mechanical

На рисунке 19 цифрами обозначено: 1 – Дерево настроек анализа; 2 – Детальные настройки дерева настроек; 3 – Лента с дополнительными настройками. В зависимости от того, на какой строке дерева настроек находится курсор, будут изменяться возможные настройки на ленте; 4 – Настройки для выбора элементов модели, а также для управления различными видами модели; 5 – Окно с 3D моделью.

10⁰. Для облегчения создания конечно-элементной сетки необходимо создать именованные наборы геометрии.

Сначала нужно установить тип выбираемых элементов модели. Установите выбор только тел (Body), режим выбора – одиночный выбор (Single Select), рисунок 20.



Рисунок 20 – Настройка выбора элементов модели

При зажатой клавише Ctrl выберите все упругие подвесы модели (12 штук). После этого нажмите ПКМ и выберите пункт Create Named Selection... (Создание именованного набора элементов модели), рисунок 21.



Рисунок 21 – Создание именованного набора выбранных элементов

В появившемся окне задайте имя для выбранных упругих подвесов, рисунок 22.

Selection Name	×
[Springs]	×
Apply selected geometry	
 Apply geometry items of same: 	
Size	
🗌 Туре	
Location X	
Location Y	
Location Z	
Apply To Corresponding Mesh Nodes	
OK Cancel	

Рисунок 22 – Задание имени для выбранных упругих подвесов

После этого в Дереве настроек анализа раскройте список Named Selections. В этом списке должен появиться именованный набор Springs.

Создайте самостоятельно новый именованный набор, в который входят все тела модели (5 тел), кроме упругих элементов. Задайте имя для данного набора Body.

После этого смените тип выбираемых элементов модели. Установите выбор только рёбер модели (Edge), режим выбора – одиночный выбор (Single Select), рисунок 23.



Рисунок 23 – Смена выбора типа элементов модели

Выберите любое вертикальное ребро (толщина сенсора ММГ), рисунок 24.



Рисунок 24 – Выбор вертикального ребра

После этого создайте новый именованный набор с параметрами, как на рисунке 25.

Selection Name X
H_Springs
O Apply selected geometry
Apply geometry items of same:
✓ Size
Туре
Location X
Location Y
Location Z
Apply To Corresponding Mesh Nodes
OK Cancel

Рисунок 25 – Создание именованного набора для вертикальных рёбер упругих

подвесов

Нажмите ЛКМ на вновь созданном параметре (H_Springs), который находится в Дереве настроек анализа. Появится дополнительное окно Worksheet в котором сделайте настройки, как на рисунке 26.

	ksheet accesses									Ψ×
H	Springs									~
	Gener	ate omparisons o) 2	have units are	e done in the	e CAD Unit Sy	rstem. See he	lp for more ir	nformation.	l
	Current CAD U	nit System: 1	Metric (m, kg,	, N, S, V, A)						
						1				1
	Action	Entity Type	Criterion	Operator	Units	Value	Lower Bound	Upper Bound	Coordinat	1
	Action Add	Entity Type Body	Criterion Named Sel	Operator Equal	Units N/A	Value Springs	Lower Bound N/A	Upper Bound N/A	Coordinat N/A	
	Action Add Convert To	Entity Type Body Edge	Criterion Named Sel N/A	Operator Equal N/A	Units N/A N/A	Value Springs N/A	Lower Bound N/A N/A	Upper Bound N/A N/A	Coordinat N/A N/A	
a a a	Action Add Convert To Filter	Entity Type Body Edge Edge	Criterion Named Sel N/A Size	Operator Equal N/A Equal	Units N/A N/A µm	Value Springs N/A 40,	Lower Bound N/A N/A N/A	Upper Bound N/A N/A N/A	Coordinat N/A N/A N/A	
বিব	Action Add Convert To Filter	Entity Type Body Edge Edge	Criterion Named Sel N/A Size	Operator Equal N/A Equal	Units N/A N/A µm	Value Springs N/A 40,	Lower Bound N/A N/A N/A	Upper Bound N/A N/A N/A	N/A N/A N/A N/A	
तत	Action Add Convert To Filter	Entity Type Body Edge Edge	Criterion Named Sel N/A Size	Operator Equal N/A Equal	Units N/A N/A µm	Value Springs N/A 40,	Lower Bound N/A N/A N/A	Upper Bound N/A N/A N/A	Coordinat N/A N/A N/A	

Рисунок 26 – Выбор вертикальных рёбер только упругих подвесов

Таким образом были выбраны все вертикальные рёбра, принадлежащие только упругим подвесам.

Снова выберите любое вертикальное ребро и создайте именованный набор с параметрами как на рисунке 27.

Selection Name X
H_Body
Apply selected geometry
Apply geometry items of same:
✓ Size
П Туре
Location X
Location Y
Location Z
Apply To Corresponding Mesh Nodes
OK Cancel

Рисунок 27 – Создание именованного набора для вертикальных рёбер тел модели Нажмите ЛКМ на вновь созданном параметре (H_Body), который находится в Дереве настроек анализа. Появится дополнительное окно Worksheet в котором сделайте настройки, как на рисунке 28.

Works	heet accordence									μ ×		
H_	Body 🧕									~		
Not	Generate 3 Note: Internal comparisons of values that have units are done in the CAD Unit System. See help for more information. Current CAD Unit System: Metric (m, kg, N, s, V, A)											
	Action	Entity Type	Criterion	Operator	Units	Value	ower Bound	Upper Bound	Coordinat	П		
	Add	Body	Named Sel	Equal	N/A	Body	N/A	N/A	N/A	1		
	Convert To	Edge	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			
	Filter	Edge	Size	Equal	μm	40,	N/A	N/A	N/A			

Рисунок 28 – Выбор вертикальных рёбер всех тел, кроме упругих подвесов

Таким образом, завершена подготовка перед созданием конечно-элементной сетки.

11⁰. Создание конечно-элементной сетки.

Перед созданием конечно-элементной сетки сначала нужно указать тела, для которых будет применяться управление сеткой. В дереве настроек анализа нажмите ПКМ на строке Mesh и выберите пункт Sizing, рисунок 29.



Рисунок 29 – Добавление функции управления размером сетки

После этого станут доступны дополнительные настройки для созданной функции управления размером. Сделайте настройки, как на рисунке 30.

Details of "Edge Sizing" - Sizing 🚥 🔻 🕂 🗙				
-	Scope			
	Scoping Method	Named Selection		
	Named Selection	H_Springs		
Ξ	- Definition			
	Suppressed	No		
	Туре	Number of Divisions		
	Number of Divisions	4		
Ξ	- Advanced			
	Behavior	Soft		
	Bias Type	No Bias		

Рисунок 30 – Настройка дополнительных параметров

Настройки Sizing, указанными на рисунке 30, мы указываем программе, что количество конечных элементов для упругих подвесов вдоль оси Z должно быть равно 4.

Создайте новую функцию управления размером сетки и задайте параметры, как на рисунке 31.

Details of "Edge Sizing 2" - Sizing 👓 🔻 📮 🗖 🗙				
-	Scope			
	Scoping Method	Named Selection		
	Named Selection	H_Body		
-	Definition			
	Suppressed	No		
	Туре	Number of Divisions		
	Number of Divisions	2		
-	Advanced			
	Behavior	Soft		
	Bias Type	No Bias		

Рисунок 31 – Настройка дополнительных параметров

Создайте ещё одну функцию управления размером сетки, с параметрами как на рисунке 32.

Details of "Body Sizing" - Sizing 👐 🖛 🗖 🗖 🗙				
-	Scope			
	Scoping Method	Named Selection		
	Named Selection	Springs		
Ξ	- Definition			
	Suppressed	No		
	Туре	Element Size		
	Element Size	2, µm		
Advanced				
	Defeature Size	Default		
	Behavior	Soft		

Рисунок 32 – Задания размера конечно-элементной сетки для упругих подвесов

После этого создайте конечно-элементную сетку. Для этого нажмите ПКМ на строке Mesh и выберите пункт Generate mesh. После этого будет создана конечноэлементная модель ММГ, учитывающая параметры, заданные на рисунках 30-32. Полученная конечно-элементная модель представлена на рисунке 33.



Рисунок 33 – Конечно-элементная модель ММГ

Раскройте пункт Statistics, в котором можно узнать количество узлов и элементов из которых состоит конечно-элементная модель ММГ.

12⁰. Задание закреплений для упругих подвесов.

Нажмите ПКМ на строке Modal и выберите пункт Fixed Support (Полное закрепление), рисунок 34.



Рисунок 34 – Добавление функции полного закрепления

Смените тип выбираемых элементов модели. Установите выбор только поверхностей модели (Face), режим выбора – одиночный выбор (Single Select), рисунок 35.



Рисунок 35 – Смена выбора типа элементов модели

Зажмите кнопку Ctrl и используя ЛКМ выберите 8 концов упругих подвесов и в окне Details of "Fixed Supports", нажмите кнопку Apply. Зафиксированные поверхности подсветятся синим цветом, рисунок 36.



Рисунок 36 – Закрепление упругих подвесов

13⁰. Запуск на расчёт и обработка результатов модального анализа.

Нажмите на строке Solution, относящейся к компоненту Modal и выберите пункт Solve, рисунок 37.



Рисунок 37 – Запуск модального анализа на расчёт

После окончания расчёта числовые значения модального анализа отобразятся в окне Tabular Data. При зажатой клавише Ctrl выберите первые 3 результата, нажмите ПКМ и выберите пункт Create Mode Shape Results, рисунок 38.



Рисунок 38 – Создание результатов анализа

После этого автоматически будут созданы 3 результата анализа для модального анализа. Нажмите на любом из них ПКМ и выберите строку Evaluate All Results, рисунок 39.



Рисунок 39 – Обновление добавленных результатов анализа

Таким образом были определены собственные частоты и формы колебаний ММГ.

14⁰. Определение силы, создаваемой гребенчатым приводом (ГП) вдоль оси Ү первичных колебаний.

ГП с изменяемой площадью перекрытия предназначены для линеаризации изменения емкости в зависимости от смещения и применяются для того, чтобы обеспечить постоянную электростатическую силу по отношению к смещению. Конструкция встречно-гребенчатого привода основана на создании усилия срабатывания за счет ряда параллельных пластин, скользящих параллельно друг другу, без изменения зазора между пластинами, рисунок 40.





Электростатическая сила, создаваемая в направлении X для двух параллельных пластин, определяется по формуле 2.

$$F_{x} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} \cdot U^{2} = \frac{1}{2} \frac{\partial (x_{0} - x)}{\partial x} \frac{\varepsilon \varepsilon_{0} z_{0}}{y_{0}} \cdot U^{2}$$
(1)

$$F_x = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_0 Z_0}{y_0} \cdot U^2 \cdot N \tag{2}$$

 ε_0 – Электрическая постоянная равная 8,854*10⁻¹² Ф/м; Z₀ – высота гребёнки в направлении оси Z; y₀ – расстояние между гребёнками; *N* – Количество емкостей входящих в ГС, шт.

Сила, создаваемая торцами ГП, рисунок 41 и определяется по формуле 3.



Рисунок 41 – К определению силы, создаваемой торцами гребёнок ГП

$$F_{y} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial y} \cdot U^{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_{0} z_{0} x_{0}}{y_{0}^{2}} \cdot U^{2} \cdot N$$
(3)

После этого определите суммарную силу по формуле 4.

$$\Sigma F = F_x \cdot n_1 + F_y \cdot n_2, \tag{4}$$

где *n*₁ – количество емкостей с изменяемой площадью перекрытия, шт.;

*n*₂ – количество торцевых емкостей, шт.

Для того чтобы определить силу, создаваемую ГП вдоль оси первичных колебаний, используйте размеры гребенчатых структур, полученных на шаге 5⁰. Для ускорения расчёта воспользуйтесь программой MathCad. Напряжение задайте равным 10 В. Таким образом, определяется сила, которую создают гребенчатые структуры для создания первичных колебаний ИМ ММГ.

15⁰. Создание первого гармонического анализа.

Для первого гармонического анализа в Analysis Setting задайте параметр Range Minimum равным 0 Гц, параметр Range Maximum равным 10000 Гц, параметр Solution Intervals равным 51, рисунок 42.



Рисунок 42 – Задание настроек для первого гармонического анализа

Добавьте нагрузку Force. Для этого, нажмите ПКМ на строке первого гармонического анализа и выберите пункт Force, рисунок 43.



Рисунок 43 – Добавление нагрузки в виде силы

Выберите поверхность приложения силы (подсвечено красным цветом) и её направление (красная стрелка), как указано на рисунке 44.



Рисунок 44 – Приложение силы для создания первичных колебаний

Параметр Magnitude установите равным силе, создаваемой ГП для создания первичных колебаний, полученном на шаге **14**⁰.

Нажмите ЛКМ на строке Solution первого гармонического анализа. Затем нажмите на вкладку Solution. Раскройте список Chart. Затем раскройте список Frequency Response и выберите пункт Deformation, рисунок 45.



Рисунок 45 – Создание результата первого гармонического анализа

Для параметра Geometry, выберите все тела принадлежащие модели и нажмите кнопку Apply. Параметр Orientation задайте равным Y Axis, рисунок 46.



Рисунок 46 – Настройка первого результата гармонического анализа

Для запуска на расчёт первого гармонического анализа нажмите ПКМ на строке Solution и выберите пункт Solve.

16⁰. Обработка результатов первого гармонического анализа.

Таким образом, по результатам решения первого гармонического анализа будет получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ИМ ММГ вдоль оси возбуждения первичных колебаний.

Запишите максимальное значение АЧХ вдоль оси первичных колебаний.

Сохраните АЧХ первичных колебаний. Для этого, в результатах первого гармонического анализа ЛКМ выберите Frequency Response. В результате этого отобразится АЧХ. Также внизу появится окно Tabular Data в котором записаны все координаты АЧХ. Нажмите в этом окне в любом месте ПКМ и выберите пункт Export. Сохраните файл с данными в папке Вашего проекта.

17⁰. Создание второго гармонического анализа.

Для второго гармонического анализа в Analysis Setting задайте те же параметры что и для первого гармонического анализа.

В качестве нагрузки будет использоваться сила Кориолиса, воздействующая на ИМ ММГ вдоль оси чувствительности. Данная сила определяется по формуле 5.

$$F_k = 2 \cdot m \cdot (\omega \cdot \nu), \tag{5}$$

где m – масса ИМ исследуемого ММГ равная 6,48941 · 10⁻⁸ кг;

w – угловая скорость вращения основания вокруг оси Z равная 300 град/сек;

v – линейная скорость движения ИМ, которая определяется по формуле 6.

$$v = f \cdot a_n,\tag{6}$$

где *f* – собственная частота колебаний по оси чувствительности (X) ММГ, Гц;

 a_n – амплитуда первичных колебаний, м.

Добавьте нагрузку Force для второго гармонического анализа. Выберите поверхность приложения силы F_k (подсвечено красным цветом) и её направление (красная стрелка), как указано на рисунке 47.



Рисунок 47 – Приложение силы Кориолиса вдоль оси Х

Параметр Magnitude установите равным ранее рассчитанной силе Кориолиса.

Создайте результат для второго гармонического анализа такой же, как и для первого гармонического анализа, только параметр Orientation сделайте равным X Axis, рисунок 48.



Рисунок 48 – Настройка результата анализа для второго гармонического анализа Запустите второй гармонический анализ на расчёт.

В результате будет получена АЧХ ИМ ММГ вдоль оси вторичных колебаний. Запишите максимальную амплитуду перемещений *A*₂ из АЧХ вдоль оси вторичных колебаний и экспортируйте АЧХ в файл.

18⁰. Определение чувствительности ГС по оси вторичных колебаний.

Далее необходимо определить на сколько изменится ёмкость при перемещении ИМ вдоль оси чувствительности ММГ при воздействии угловой скорости равной 1 град/сек. Для этого воспользуйтесь программой MathCad.

Сначала определяется зависимость отклонения ИМ вдоль оси чувствительности от угловой скорости Δl . Для этого, необходимо максимальную

амплитуду АЧХ разделить на соответствующую ей угловую скорость вращения основания ИМ. Единица измерения м/град/сек.

$$\Delta l = \frac{A_2}{\omega},\tag{7}$$

где A_2 – максимальная амплитуда перемещений по оси вторичных колебаний, полученная на шаге 17⁰, м;

w – угловая скорость вращения основания вокруг оси Z равная 300 град/сек.

На следующем шаге необходимо определить начальную ёмкость C_0 ГС вдоль оси чувствительности. Далее определите ёмкость C_1 ГС в случае, когда на ИМ воздействует угловая скорость вращения равная 1 град/сек. После этого вычтите из C_1 значение C_0 .

$$\Delta C = C_1 - C_0 \tag{8}$$

И таким образом Вы получите чувствительность ММГ относительно к изменению ёмкости. Единица измерения Ф/град/сек.

19⁰. Повторите шаги 17⁰ и 18⁰ делая угловую скорость вращения равной 200, 100 и 50 град/сек.

Содержание отчёта

1. Цель.

2. 3D-модель гироскопа из программы Space Claim.

3. 3D-модель с наложенной КЭ сеткой.

4. Скриншот из программы ANSYS Workbench на котором будет отчётливо видно количество конечных элементов и узлов модели.

5. Первые 3 собственные формы и частоты колебаний сенсора ММГ.

6. График АЧХ первичных колебаний построенный в программе Excel.

7. График АЧХ вторичных колебаний при угловой скорости вращения основания равной 300, 200, 100, 50 град/сек построенный в программе Excel.

8. Значения чувствительности сенсора ММГ при угловой скорости вращения равной 300, 200, 100, 50 град/сек.

9. Каким образом можно повысить чувствительность сенсора ММГ?

10. Выводы по работе.