

Разработка шестикомпонентного тензорезисторного датчика усилий

Студент: Корепов Д.В, группа 4-33

Руководитель : Белов И.А, ст. преп.

Объект исследования

- Объектом исследования является шестикомпонентный тензорезисторный датчик усилий

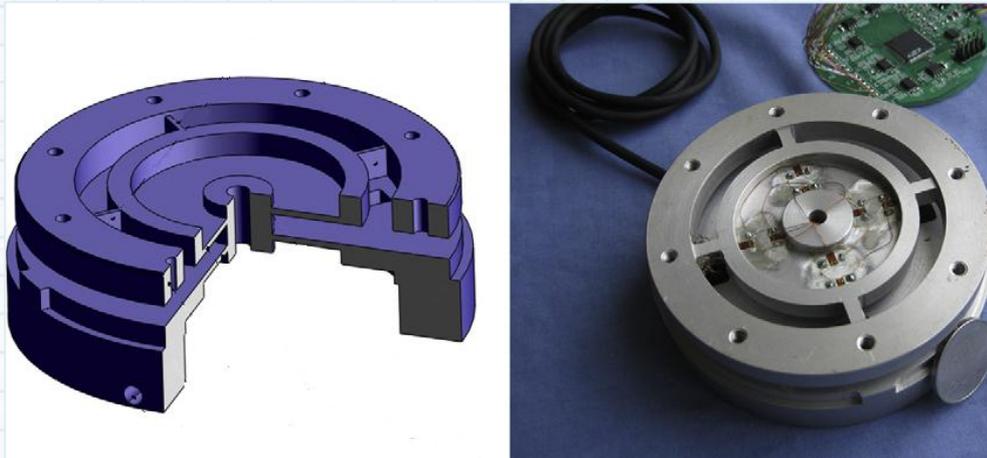


Рис. 1. Прототип разрабатываемого датчика



Рис. 2. Устройство захвата
робота с очувствленным
элементом

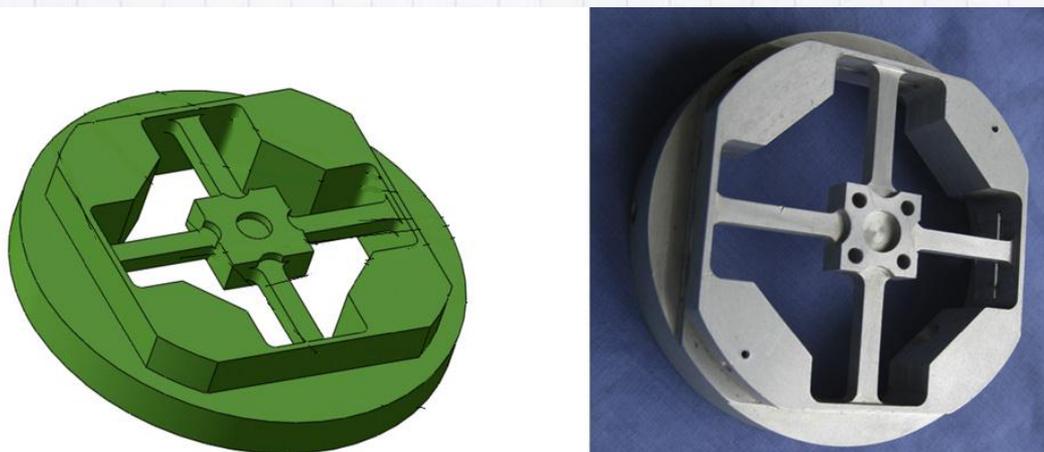


Рис. 3. Датчик с упругим телом «мальтийский крест»

Цель работы

- Разработка датчика для измерения трех компонент силы и трех компонент момента

Задачи работы

- Анализ существующих тензорезисторных датчиков
- Выбор типа упругого элемента
- Разработка и исследование упругого элемента в программном комплексе конечноэлементного анализа ANSYS Workbench
- Анализ электрической схемы включения тензорезисторов
- Подбор тензорезисторов

Исходные данные к работе

- Диапазон измеряемых усилий: сил - ± 150 Н, моментов - ± 150 Н·мм
- Способ крепления к основанию и источнику нагрузки - фланец с резьбовыми отверстиями

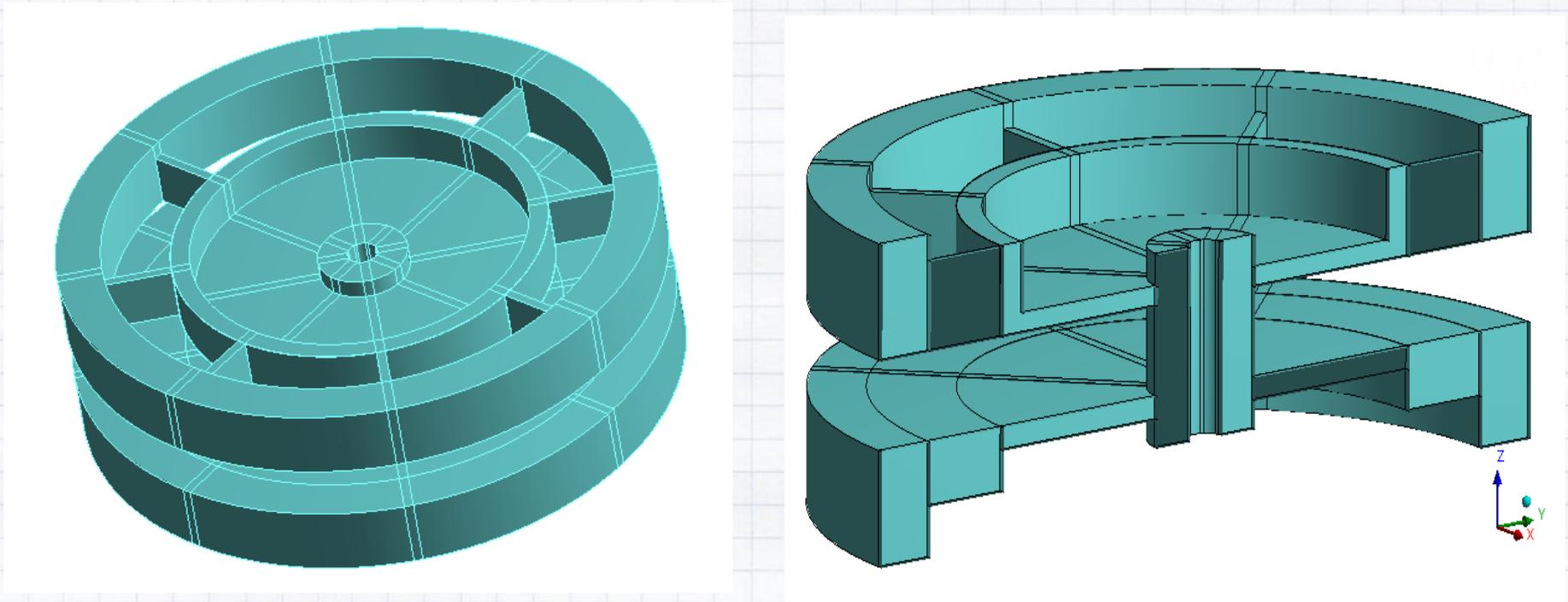


Рис. 4. Геометрическая модель

Математическая модель и методы решения

Основные расчетные соотношения МКЭ

$$\{F\} = [K]\{U\},$$

где $\{U\}$ - вектор узловых перемещений;

$[K]$ – глобальная матрица жесткости элементов;

$\{F\}$ – глобальный вектор узловых сил

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\},$$

где $\{\varepsilon\}$ - вектор полной (суммарной) деформации;

$[B]$ - матрица градиентов;

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\},$$

где $\{\sigma\}$ - вектор напряжений;

$[D]$ – матрица упругих коэффициентов;

Граничные условия

Для исследования напряженного состояния чувствительного элемента рассмотрены 6 случаев нагружения. Нагрузка передается чувствительному элементу через верхний фланец. Нижний фланец жестко закреплен.

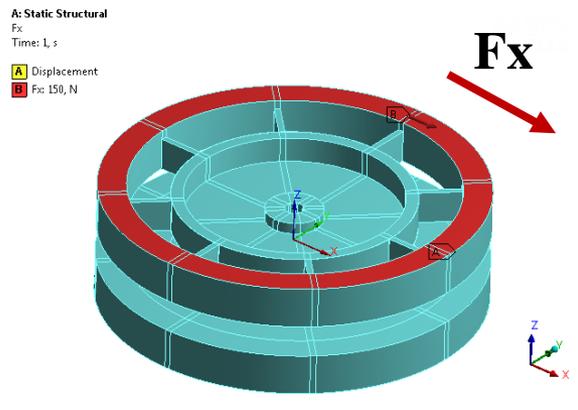


Рис. 5. Приложенная сила F_x

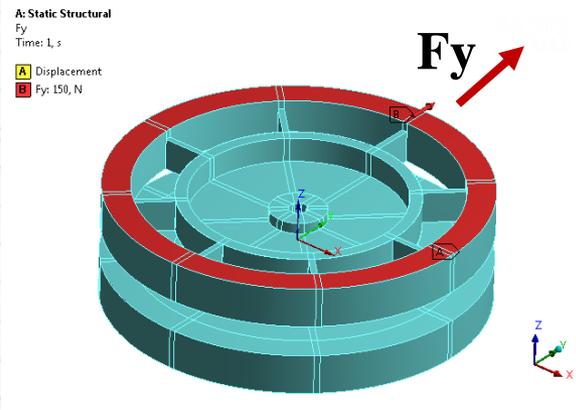


Рис. 6. Приложенная сила F_y

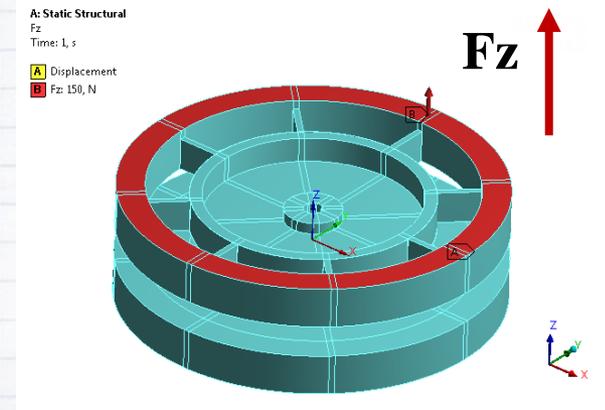


Рис. 7. Приложенная сила F_z

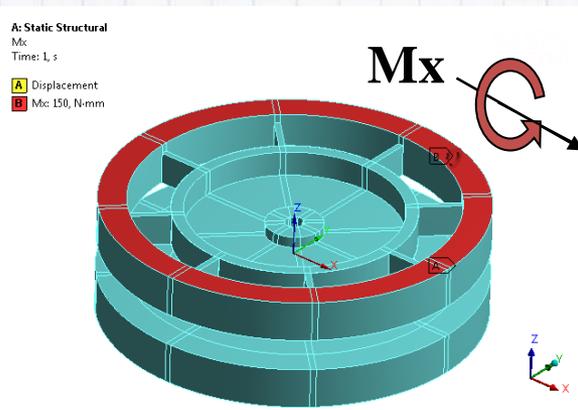


Рис. 8. Приложенный момент M_x

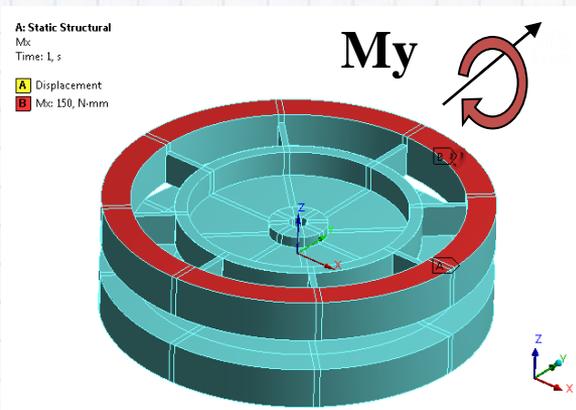


Рис. 9. Приложенный момент M_y

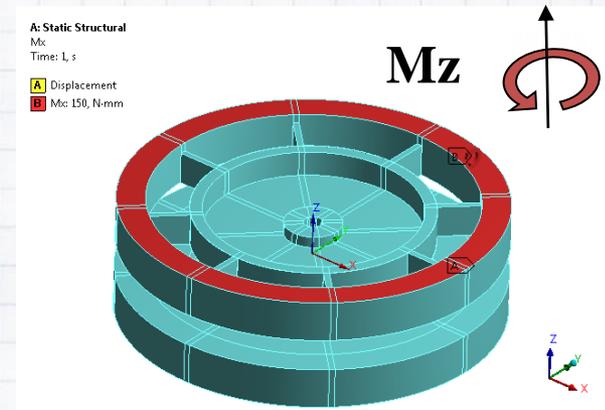


Рис. 10. Приложенный момент M_z

Рис. 8. Приложенный момент M_x Рис. 9. Приложенный момент M_y Рис. 10. Приложенный момент M_z

Места установки тензорезисторов

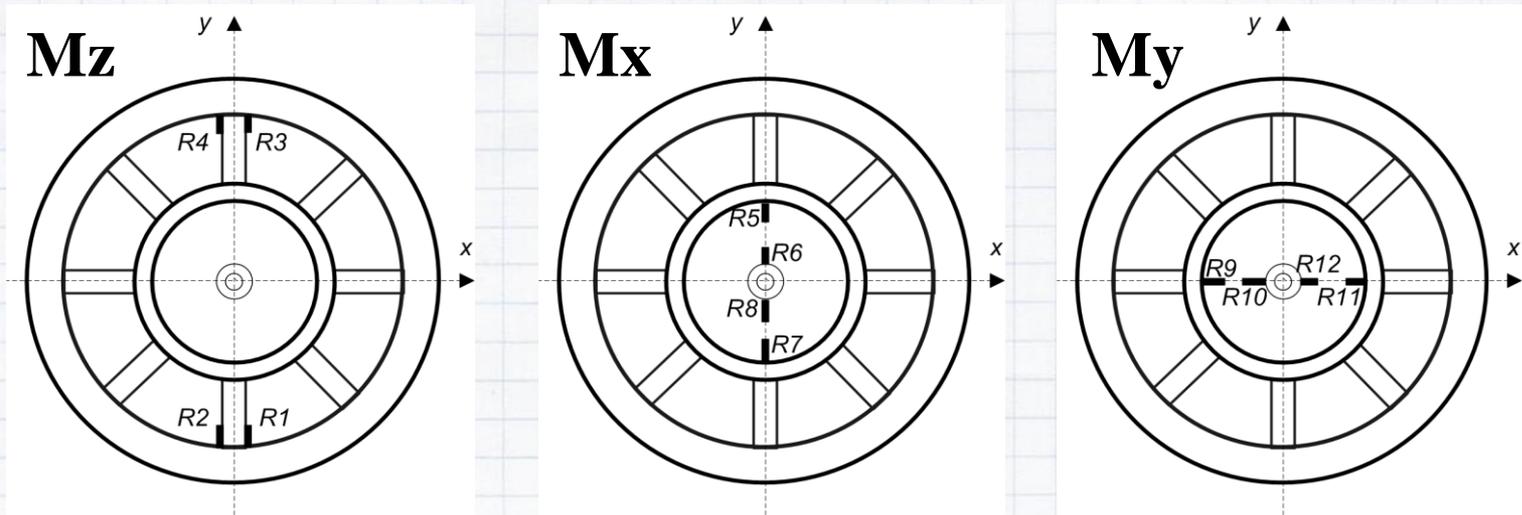


Рис. 11. Места установки тензорезисторов на верхней мембране

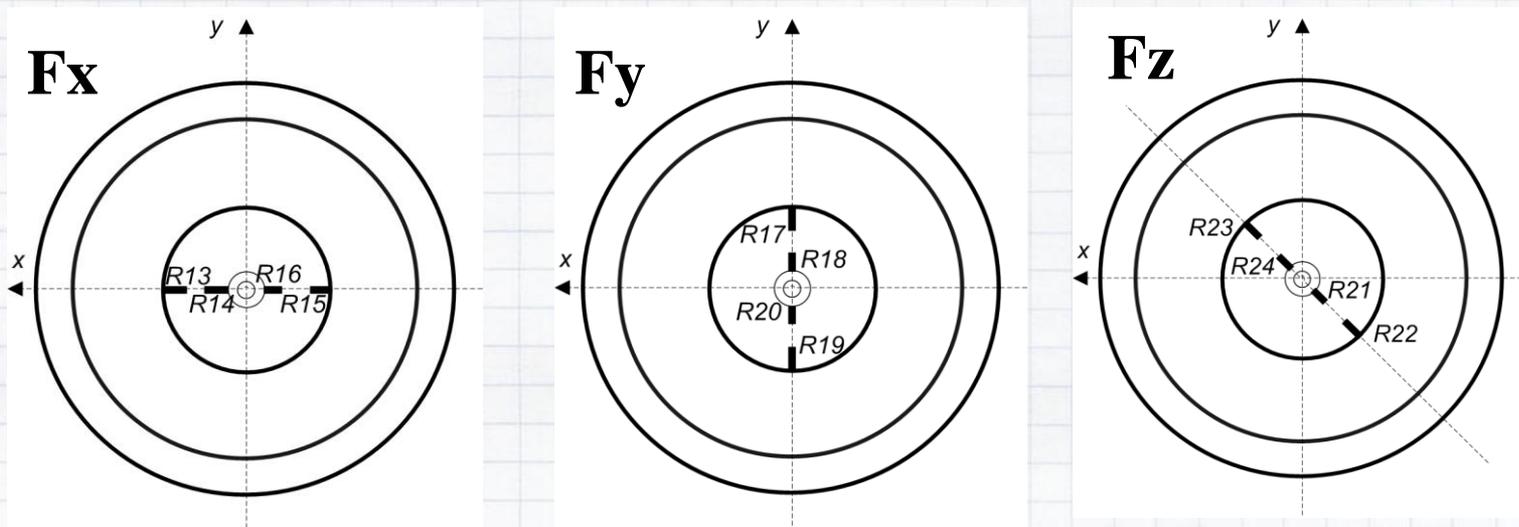


Рис. 12. Места установки тензорезисторов на нижней мембране

Электрическая схема включения тензорезисторов

Условие баланса моста:

$$R1 \cdot R4 = R2 \cdot R3$$

Выходное напряжение, пропорциональное приложенной нагрузке:

$$\Delta U = \left(\frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R4}{R4} - \frac{\Delta R3}{R3} \right) \cdot U_{num}$$

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = k \cdot \varepsilon_i, i = 1, 2, 3, 4$$

$$\Delta U = k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3) \cdot U_{num}$$

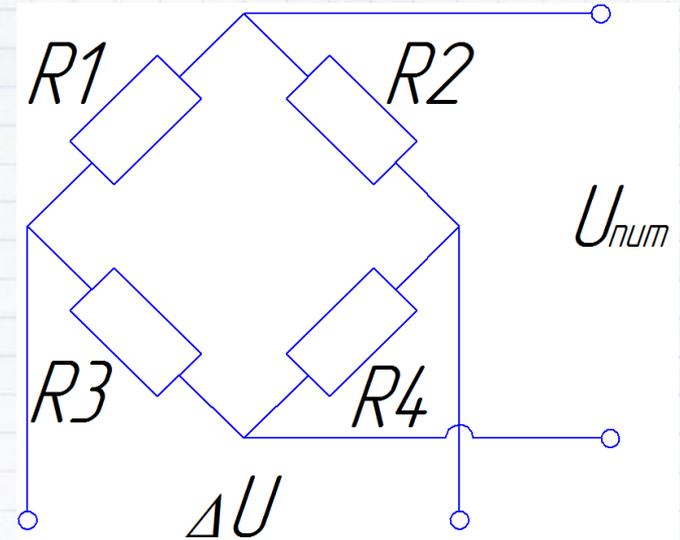


Рис. 13. Мост Уитстона

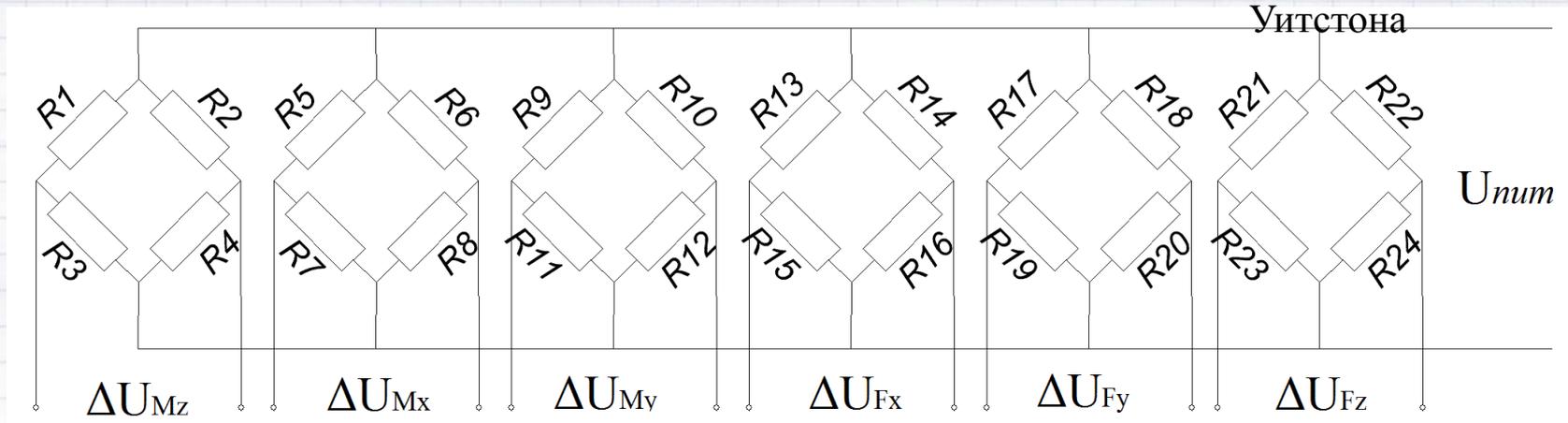
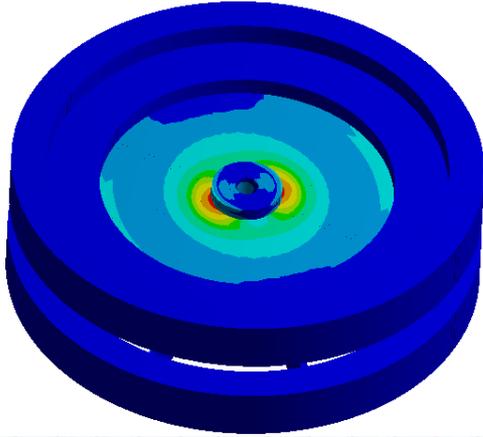
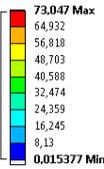


Рис. 14. Общая схема включения

Деформации, возникающие при приложении силы F_x

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1



A: Static Structural
Normal Elastic Strain
Type: Normal Elastic Strain(X Axis)
Unit: mm/mm
Global Coordinate System
Time: 1

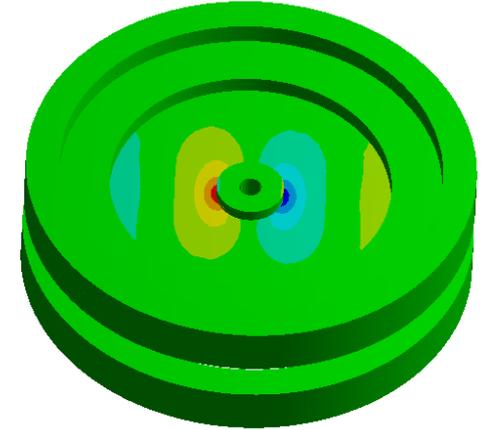
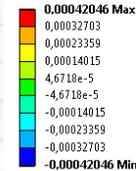


Рис. 15. Картина распределения эквивалентных напряжений

Рис. 16. Картина распределения деформаций

Нагрузочный случай	Значение деформации				ΔU
	ϵ_{R13}	ϵ_{R14}	ϵ_{R15}	ϵ_{R16}	
M_z (150 Н·мм)	$-4,21 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	$4,21 \cdot 10^{-11}$	$2,27 \cdot 10^{-11}$	≈ 0
M_x (150 Н·мм)	$-7,30 \cdot 10^{-10}$	$-1,75 \cdot 10^{-10}$	$7,48 \cdot 10^{-10}$	$1,75 \cdot 10^{-10}$	≈ 0
M_y (150 Н·мм)	$-4,84 \cdot 10^{-6}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$-1,48 \cdot 10^{-5}$	$k(-3,94 \cdot 10^{-5}) U_{\text{пит}}$
F_x (150 Н)	$-8,86 \cdot 10^{-5}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$8,86 \cdot 10^{-5}$	$-2,40 \cdot 10^{-4}$	$k(-6,57 \cdot 10^{-4}) U_{\text{пит}}$
F_y (150 Н)	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$2,96 \cdot 10^{-9}$	$-1,28 \cdot 10^{-8}$	$-2,95 \cdot 10^{-9}$	≈ 0
F_z (150 Н)	$7,59 \cdot 10^{-5}$	$-9,76 \cdot 10^{-5}$	$7,59 \cdot 10^{-5}$	$-9,76 \cdot 10^{-5}$	≈ 0

Таблица 1. Значения деформации в местах установки тензорезисторов R13-R16

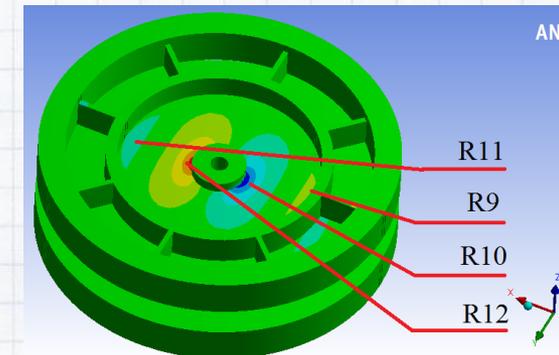


Рис. 17. Места аппликации датчиков для группы F_x

Расположение тензорезисторов группы

$$\Delta U_{Fz}$$

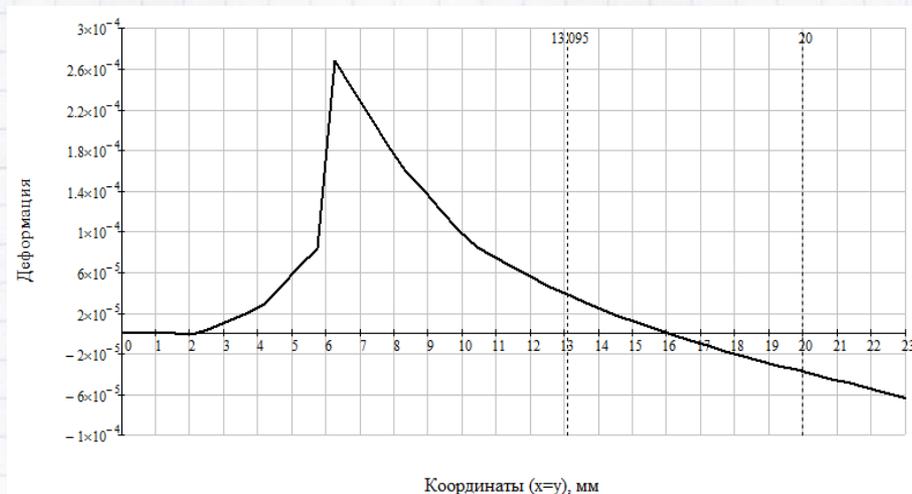
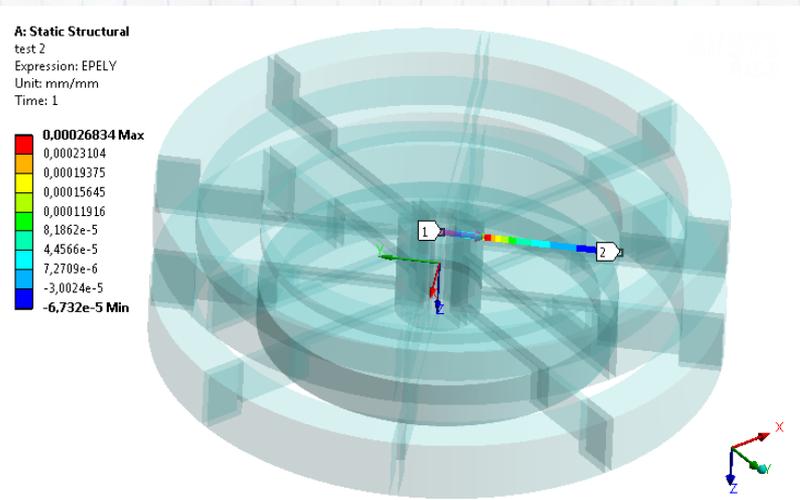


Рис. 18. Применение инструмента «Path»

Рис. 19. График деформации на оси расположения датчиков группы Fz при нагрузке моментом Mx

Нагрузочный случай	Значение деформации				ΔU
	ϵ_{R21}	ϵ_{R22}	ϵ_{R23}	ϵ_{R24}	
Mz (150 Н·мм)	$1,18 \cdot 10^{-11}$	$-1,28 \cdot 10^{-11}$	$-1,29 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-11}$	≈ 0
Mx (150 Н·мм)	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$-1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$-2,62 \cdot 10^{-6}$	≈ 0
My (150 Н·мм)	$-2,62 \cdot 10^{-6}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$-1,94 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	≈ 0
Fx (150 Н)	$-3,78 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$-3,78 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	≈ 0
Fy (150 Н)	$-3,78 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$-3,78 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	≈ 0
Fz (150 Н)	$-1,79 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-5}$	$5,73 \cdot 10^{-5}$	$-1,79 \cdot 10^{-6}$	$k(-1,18 \cdot 10^{-4})U_{пит}$

Таблица 2. Значения деформации в местах установки тензорезисторов R21-R24

Обеспечение поперечной независимости ¹¹ измерительных каналов

Функция преобразования
датчика

$$F = WN,$$

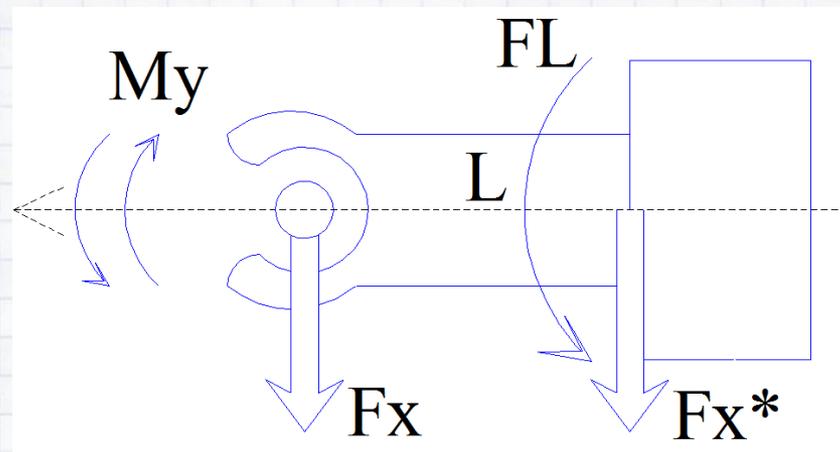


Рис. 20. Возникающий побочный момент

где $N = [\Delta U_x \quad \Delta U_y \quad \Delta U_z \quad \Delta U_{Mx} \quad \Delta U_{My} \quad \Delta U_{Mz}]^T$ – входной вектор электрических сигналов (напряжения на выходах чувствительных мостов);

$F = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z]^T$ – выходной вектор сил и моментов после осуществления разделения;

W – матрица развязки

Вычисление коэффициентов матрицы развязки

$$N1 = \begin{pmatrix} -6.565 \times 10^{-4} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -3.9 \times 10^{-5} \\ 0 \end{pmatrix} \quad N2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -6.57 \times 10^{-4} \\ 0 \\ 3.94 \times 10^{-5} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad N3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1.18 \times 10^{-4} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad N4 = \begin{pmatrix} 0 \\ -4.467 \times 10^{-4} \\ 0 \\ -5.54 \times 10^{-5} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad N5 = \begin{pmatrix} 4.467 \times 10^{-4} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5.54 \times 10^{-5} \\ 0 \end{pmatrix} \quad N6 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -7.8 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

$$150 = W_{1,1} \cdot N1_1 + W_{1,5} \cdot N1_5$$

$$0 = W_{5,1} \cdot N1_1 + W_{5,5} \cdot N1_5$$

$$150 = W_{2,2} \cdot N2_2 + W_{2,4} \cdot N2_4$$

$$0 = W_{4,2} \cdot N2_2 + W_{4,4} \cdot N2_4$$

$$150 = W_{3,3} \cdot N3_3$$

$$0 = W_{2,2} \cdot N4_2 + W_{2,4} \cdot N4_4$$

$$150 = W_{4,2} \cdot N4_2 + W_{4,4} \cdot N4_4$$

$$0 = W_{1,1} \cdot N5_1 + W_{1,5} \cdot N5_5$$

$$150 = W_{5,1} \cdot N5_1 + W_{5,5} \cdot N5_5$$

$$150 = W_{6,6} \cdot N6_6$$

$$W = \text{Find}(W) = \begin{pmatrix} -4.386 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 3.536 \times 10^6 & 0 \\ 0 & -1.539 \times 10^5 & 0 & 1.241 \times 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.271 \times 10^6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.094 \times 10^5 & 0 & -1.825 \times 10^6 & 0 & 0 \\ -3.087 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 5.197 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.923 \times 10^7 \end{pmatrix}$$

$$F1 = W \cdot N1 = \begin{pmatrix} 150 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -2.842 \times 10^{-14} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F2 = W \cdot N2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 150 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F3 = W \cdot N3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 150 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F4 = W \cdot N4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 150 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F5 = W \cdot N5 = \begin{pmatrix} -2.842 \times 10^{-14} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 150 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F6 = W \cdot N6 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 150 \end{pmatrix}$$

Выбор тензорезистора

Для аппликации на упругом элементе тензорезисторного датчика выбран следующий тип тензорезистора:

Производитель: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

Тип: линейный тензорезистор серии LY11

Конструкция тензорезистора: фольговый тензорезистор с измерительной решеткой

Материал: константановая фольга

Коэффициент преобразования: 2

Рабочая температура: $-70 \dots +200$ °C

Номинальное сопротивление: 120 Ом

Размеры измерит. решетки: 0.3x0.9 мм

Размер подложки измерительной решетки: 2x1.2 мм

Заключение

- Разработан проект тензорезисторного датчика, позволяющего измерять 3 компоненты силы по трем ортогональным осям и три компоненты момента вокруг этих трех осей.
- Построена геометрическая модель и был проведен эксперимент по приложению усилий к упругому телу датчика. Так как возникающие деформации и напряжения не превышают допустимых, то с целью уменьшения массы датчика возможна замена материала датчика на алюминий. Диапазон измерений может быть увеличен, так как возникающие напряжения далеки до предельных. Так же возможно проведение оптимизации геометрических размеров датчика.
- Проанализирована схема включения тензорезисторов в общую измерительную цепь и определены места аппликации тензорезисторов.
- Для исключения влияния на измерение других усилий, была обеспечена поперечная независимость измерительных каналов между друг другом.
- Для аппликации был выбран тип тензорезистора LY11 производителя Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.