

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 №3

**Определение ёмкости гребенчатых структур аналитически
в программе MathCad**

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 определять ёмкости гребенчатых структур аналитически и используя метод конечных элементов.

Введение

Одним из самых распространённых преобразователей перемещений в микромеханических устройствах является ёмкостной тип преобразователей. Работа преобразователей этого типа основана на изменении ёмкостей между подвижным электродом, располагаемым на подвижном элементе прибора, и неподвижными электродами, размещаемым на элементах корпуса.

На рисунке 1, представлено несколько типов гребенчатых структур (ГС).

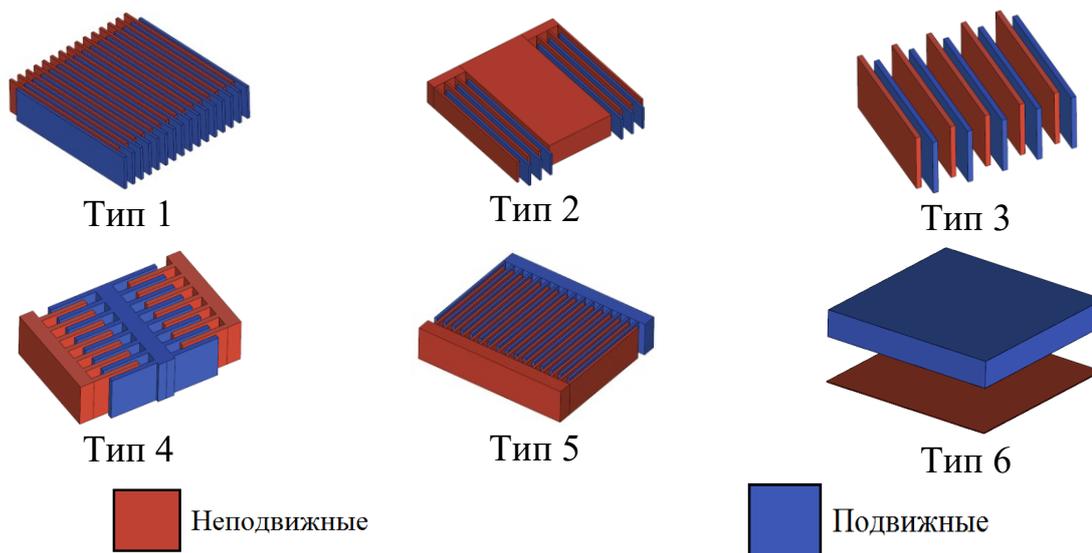


Рисунок 1 – 3D модели электродных структур

Параметры ГС тип 5 при изменении площади перекрытия представлены на рисунке 2.

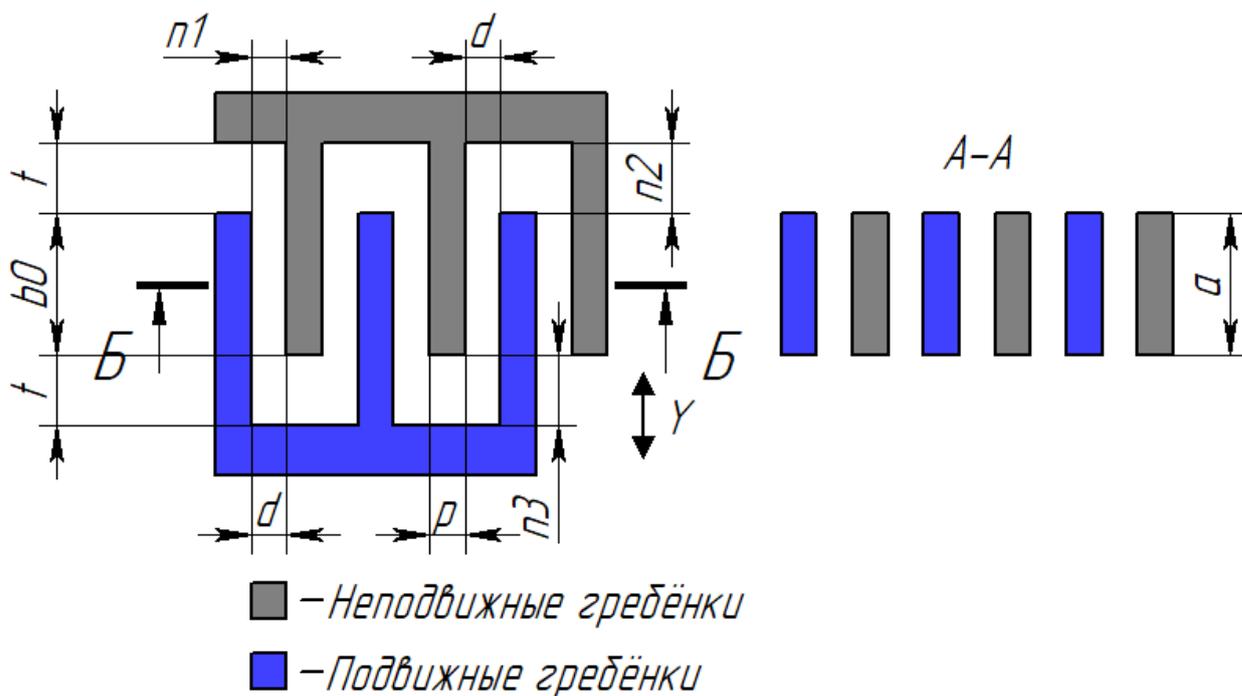


Рисунок 2 – Параметры ГС тип 5

На рисунке 2 обозначено: a – высота гребёнок; b_0 – начальная длина перекрытия гребёнок; d – расстояние между гребёнками; p – ширина одной гребёнки; t – расстояние между торцами гребёнок; n_1 – количество емкостей, входящих в суммарную ёмкость ГС; n_2, n_3 – количество торцевых емкостей, входящих в суммарную ёмкость ГС.

ГС тип 5 образуют несколько емкостей, рисунок 3.

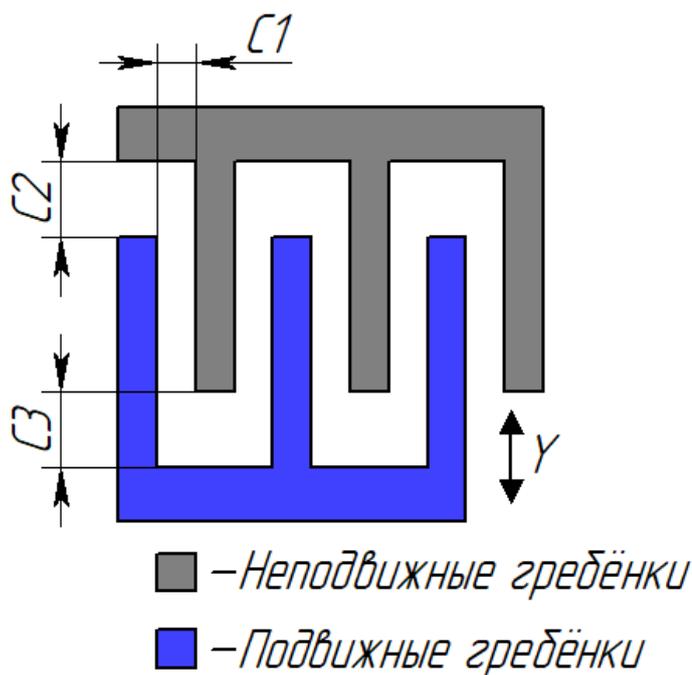


Рисунок 3 – Ёмкости ГС тип 5

Ёмкость C_1 изменяется при перемещении вдоль оси Y . Ёмкости C_2 и C_3 возникают между торцами гребёнок и вносят нелинейность в общую ёмкость ГС тип 5. Суммарная начальная ёмкость ГС тип 5

$$\sum C = C_1 \cdot n_1 + C_2 \cdot n_2 + C_3 \cdot n_3.$$

Ёмкость C_1 определяется по формуле (1) и (2) при изменении параметра b , а ёмкости C_2 и C_3 при изменении параметра d .

Параметры ГС при изменении расстояния между гребёнками представлены на рисунке 4.

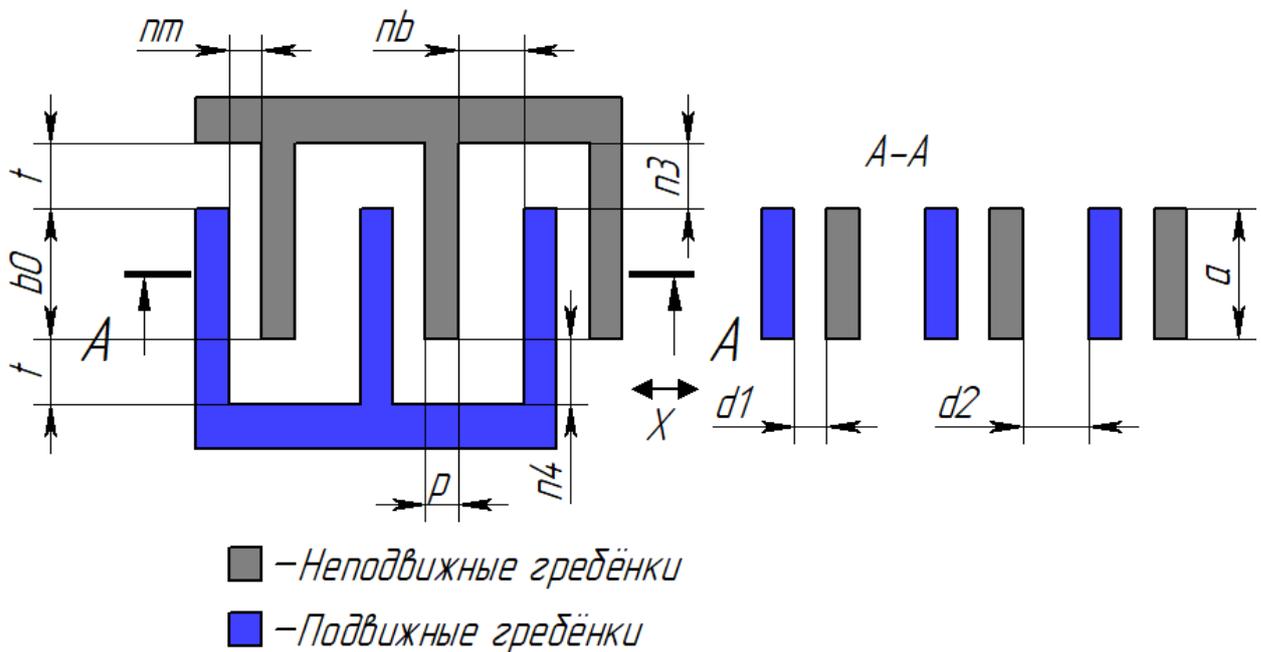


Рисунок 4 – Параметры ГС тип 3

На рисунке 4 обозначено: a – высота гребенок; b_0 – начальная длина перекрытия гребёнок; d_1 – расстояние между гребёнками; d_2 – расстояние между гребёнками; p – ширина одной гребёнки; t – расстояние между торцами гребёнок; n_m – количество емкостей, входящих в суммарную ёмкость ГС; n_b – количество емкостей, входящих в суммарную ёмкость ГС; n_3 , n_4 – количество торцевых емкостей, входящих в суммарную ёмкость ГС.

ГС тип 3 образуют несколько емкостей, рисунок 5.

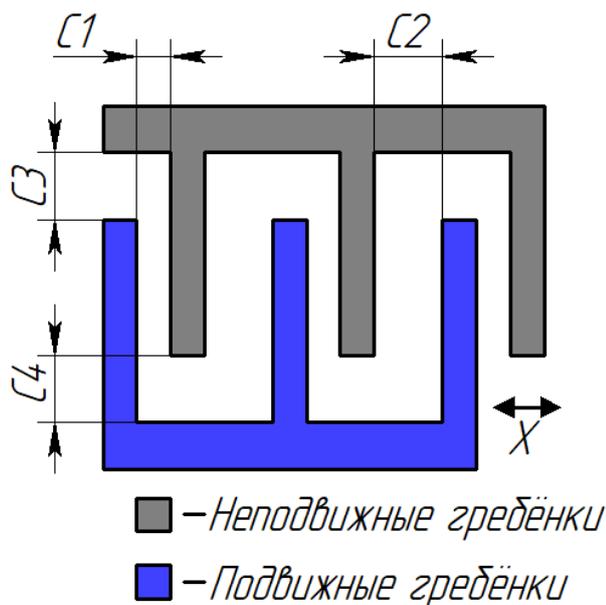


Рисунок 5 – Ёмкости ГС тип 3

При отрицательном перемещении подвижных гребёнок тип 3 вдоль оси X, ёмкость C1 увеличивается, ёмкость C2 уменьшается, а ёмкости C3 и C4 вносят постоянную составляющую в суммарную ёмкость. Суммарная начальная ёмкость ГС тип 3

$$\sum C = C1 \cdot n1 + C2 \cdot n2 + C3 \cdot n3 + C4 \cdot n4.$$

Ёмкости C1 и C2 определяются по формуле (2) при изменении параметра d, а ёмкости C3 и C4 при постоянстве всех параметров.

Формула определения ёмкости двух плоскопараллельных электродов без учёта краевых эффектов:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a b_0}{d}, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость равная 1;

ε_0 – электрическая постоянная равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

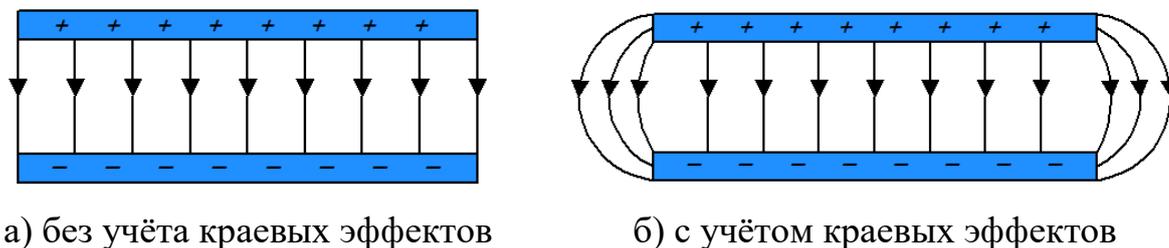
a – высота перекрытия гребёнок, м;

b_0 – начальная длина перекрытия гребёнок, м;

d – расстояние между гребёнками, м.

Данная формула является неполной, так-как не учитывает распределение потенциала на краях пластины.

На рисунке 6 представлено распределение потенциала между двумя плоскопараллельными пластинами без учёта краевых эффектов и с учётом краевых эффектов.



а) без учёта краевых эффектов

б) с учётом краевых эффектов

Рисунок 6 – Проявление краевых эффектов

Чем ближе к краям пластины, тем больше происходит проявление краевого эффекта. Ниже представлена формула определения ёмкости двух плоскопараллельных электродов с учётом краевых эффектов:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 ab_0}{d} \cdot \left(1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \cdot \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3b+a}{4a} \right) \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3a+b}{4b} \right) \right) \right) \quad (2)$$

На рисунке 7 показан однокомпонентный микромеханический гироскоп RR-типа.

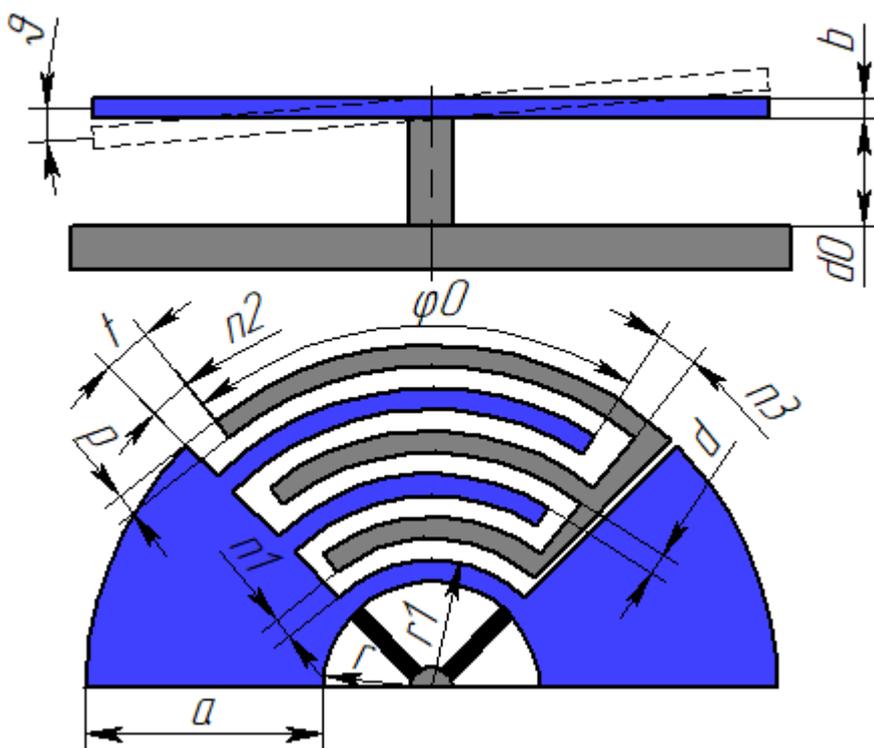


Рисунок 7 – Гироскоп RR-типа

ГС гироскопа RR-типа образуют несколько емкостей, рисунок 8.

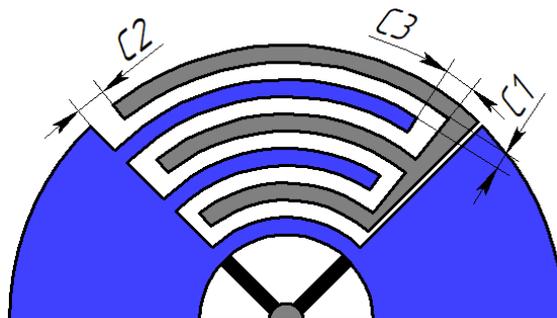


Рисунок 8 Ёмкости ГС RR-гироскопа

Суммарная начальная ёмкость ГС гироскопа RR-типа

$$\sum C = C1 \cdot n1 + C2 \cdot n2 + C3 \cdot n3.$$

Ёмкость гребенчатых структур гироскопа RR-типа определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot \varphi_0 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r1 \cdot b}{d}, \quad (3)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость равная 1 (воздух);

ε_0 – электрическая постоянная равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

φ_0 – угол перекрытия гребёнок, град;

$r1$ – радиус до поверхности гребёнки, м;

b – высота перекрытия гребёнок, м;

d – расстояние между гребёнками, м.

Ёмкость чувствительного элемента гироскопа RR-типа определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot S}{d_0 + \frac{a}{2} \cdot \vartheta}, \quad (4)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость равная 1;

ε_0 – электрическая постоянная равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

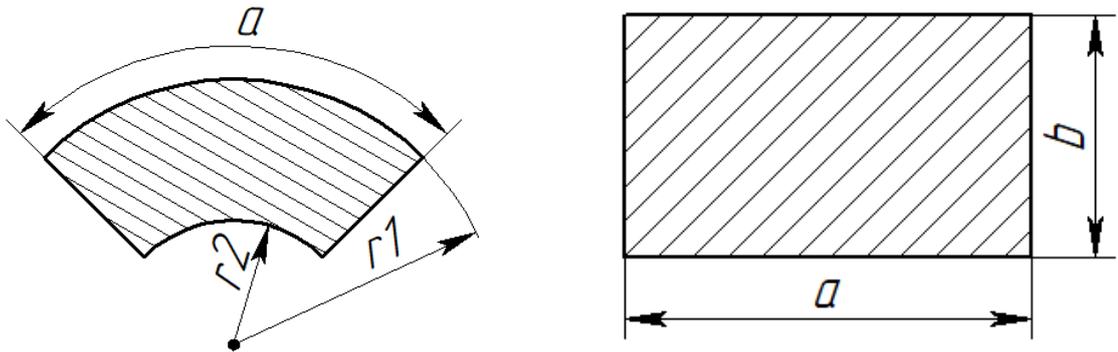
S – площадь перекрытия, м²;

d_0 – начальное расстояние между верхним и нижним электродом, м;

a – ширина перекрытия верхнего электрода, м;

ϑ – угол отклонения, град.

Форма чувствительного элемента может иметь различную форму, рисунок 9.



а) Сектор кольца

б) Прямоугольник

Рисунок 9 – Формы чувствительного элемента RR-гироскопа

Площадь сектора кольца определяется по формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot \alpha}{360} \cdot (r_1^2 - r_2^2), \quad (5)$$

где α – угол сегмента круга, град;

r_1 – радиус внешней окружности, м;

r_2 – радиус внутренней окружности, м.

На рисунке 10 представлен однокомпонентный маятниковый акселерометр.

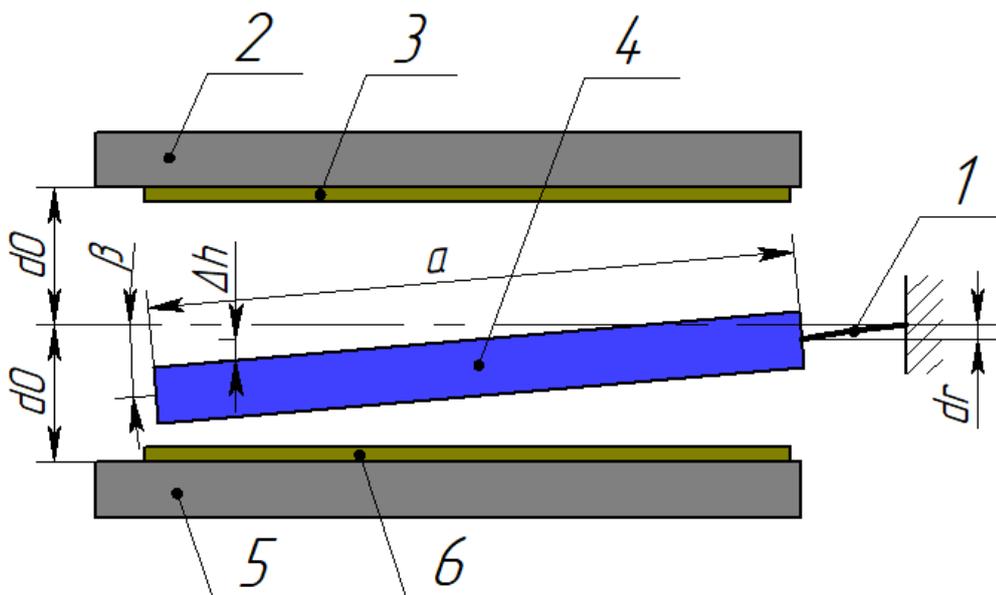


Рисунок 10 – Однокомпонентный маятниковый акселерометр

На рисунке 10 обозначено: 1 – Упругий подвес; 2 – Крышка; 3 – Верхний электрод; 4 – Чувствительная масса акселерометра; 5 – Основание; 6 – Нижний электрод.

Ёмкость однокомпонентного маятникового акселерометра определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot S}{d_0 \pm \Delta d}, \quad (6)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость равная 1;

ε_0 – электрическая постоянная равная $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

S – площадь перекрытия, м²; β Δ

d_0 – начальное расстояние между верхним и нижним электродом, м;

Δd – отклонение массы от начального положения, м, определяется по формуле:

$$\Delta d = d_r + \frac{a}{2} \cdot \beta,$$

где d_r – расстояние до начального положения, м;

β – угол, град.

Пример.

Пример определения ёмкости ГС тип 5 (рисунок 3) используя программу MathCad. Для автоматизированного определения ёмкости ГС, в программе MathCad используются подпрограммы. Определение ёмкости будет осуществляться по формуле (1), не учитывающей краевые эффекты.

1⁰. Запустите программу MathCad 14 через сайт var.tpu.ru используя свой логин и пароль ТПУ.

2⁰. Включите дополнительные панели управления на панели управления Math как показано на рисунке 11.



Рисунок 11 Панель управления Math

Если панель управления не активна, то запустите её по пути View → Toolbars → Math.

После этого станут доступны новые панели управления, рисунок 12.

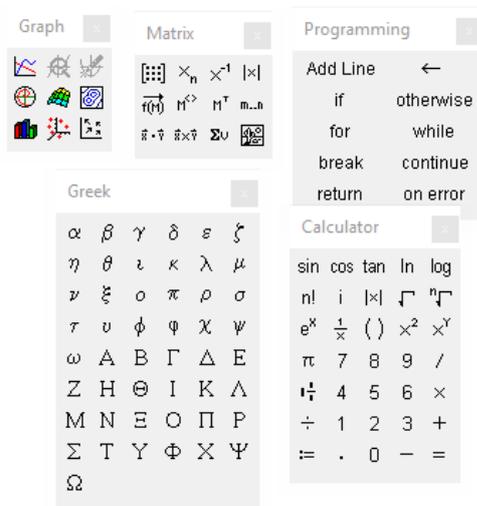


Рисунок 12 – Включенные панели управления

3⁰. Создайте новые переменные, как показано на рисунке 12.

$$a := 40 \cdot 10^{-6} \quad b := 200 \cdot 10^{-6} \quad d := 5 \cdot 10^{-6} \quad p := 5 \cdot 10^{-6} \quad t := 10 \cdot 10^{-6} \quad n1 := 20 \quad n2 := 17 \quad n3 := 17$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} := 1 \quad \varepsilon_0 := 8.854 \cdot 10^{-12}$$

Рисунок 12 – Переменные созданные в MathCad

4⁰. Создайте переменную C1 и нажмите на панели управления Programming кнопку Add Line два раза, рисунок 13.

$$C1 := \left| \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} \right.$$

Рисунок 13 – Результат операции

5⁰. Установите курсор в верхний прямоугольник, на панели управления Programming нажмите кнопку ←. Запишите выражение как показано на рисунке 14.

$$C1 := \left| \begin{array}{c} j \leftarrow 0 \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} \right.$$

Рисунок 14 – Результат операции

10⁰. Создайте подпрограммы вычисления ёмкостей C2 и C3, рисунок 19.

$$C2 := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow 0 \\ \text{for } t \in 15 \cdot 10^{-6}, 14 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-6} \\ \left| \begin{array}{l} A_{0,j} \leftarrow \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot p}{t} \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

а) Ёмкость C2

$$C3 := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow 0 \\ \text{for } t \in 15 \cdot 10^{-6}, 14 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-6} \\ \left| \begin{array}{l} A_{1,j} \leftarrow \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot p}{t} \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

б) Ёмкость C3

Рисунок 19 – Подпрограммы определения ёмкостей C2 и C3

11⁰. Для получения суммарной ёмкости ГС необходимо каждую ёмкость умножить на количество пар входящих в ГС, рисунок 20.

$$\Sigma C := C1 \cdot n1 + C2 \cdot n2 + C3 \cdot n3$$

Рисунок 20 – Суммарная ёмкость ГС

12⁰. Для построения графика зависимости изменения ёмкости ГС от их перемещения вдоль оси Y, необходимо создать подпрограмму, которая будет вычислять перемещения гребёнок относительно их начального положения, рисунок 21.

$$Y := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow 0 \\ \text{for } x \in -5 \cdot 10^{-6}, -4 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-6} \\ \left| \begin{array}{l} A_{0,j} \leftarrow x \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

Рисунок 21 – Перемещения ГС вдоль оси Y

13⁰. Для создания графика на панели управления Graph выберите график X-Y plot. Нажмите на нём 2 раза ЛКМ. В появившемся окне, на вкладке X-Y Axes, отметьте галочками пункт Grid lines (линии сетки) для X-Axis и Primary Y-Axis, а также выберите цвет линий сетки чёрный. На вкладке Traces для кривая 1 и кривая 2 задайте любые символы. Нажмите кнопку Ok. Для горизонтальной оси поставьте букву Y, для вертикальной оси напишите ΣC . В результате получится график, рисунок 22.

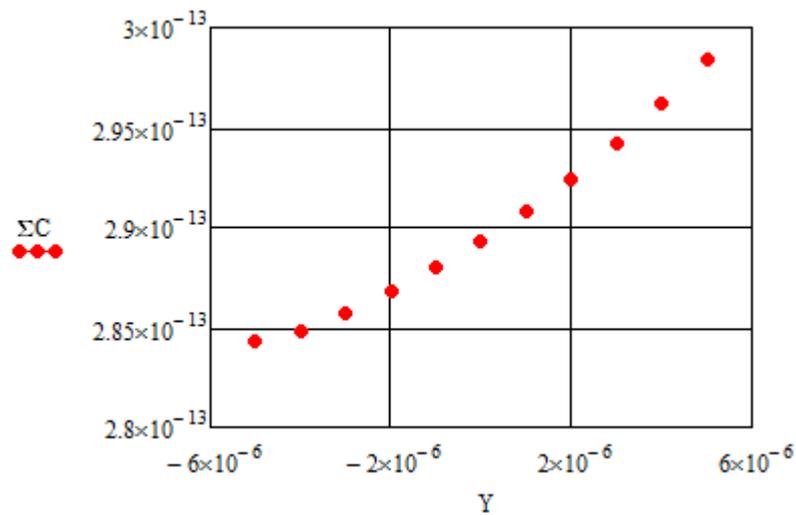


Рисунок 22 – Зависимость изменения ёмкости ГС от перемещения вдоль оси Y на ± 5 мкм относительно начального положения

Как видно на рисунке 22, график изменения ёмкости является нелинейным. Эта нелинейность обусловлена ёмкостями, возникающими между торцами гребёнок.

Задание:

1. Используя значения переменных из таблиц 1, 2, 3, согласно полученным вариантам, постройте 3D модели ГС в программе SolidWorks.
2. Из 3D-моделей определите недостающие параметры для нахождения ёмкостей.
3. Рассчитайте изменения ёмкостей ГС и постройте графики.

Таблица 1 Размеры (по вариантам) ГС тип 5 (рисунок 2)

№	d, мкм	p, мкм	t, мкм	b0, мкм	Δb0, мкм	n1
1	3	3	5	50	±4	65
2	4	4	6	60	±5	60
3	5	5	7	70	±6	55
4	6	6	8	80	±4	35
5	7	7	9	90	±5	50
6	3	8	10	100	±6	45
7	4	9	5	110	±4	40
8	5	3	6	120	±5	35
9	6	4	7	50	±6	65
10	7	5	8	60	±4	60
11	3	6	9	70	±5	55
12	4	7	10	80	±6	35
13	5	8	5	90	±4	50
14	6	9	6	100	±5	45
15	7	3	7	110	±6	40
16	3	4	8	120	±4	35
17	4	5	9	50	±5	65
18	5	6	10	60	±6	60
19	6	7	5	70	±4	55
20	7	8	6	80	±5	35
21	3	9	7	90	±6	50
22	4	3	8	100	±4	45
23	5	4	9	110	±5	40
24	6	5	10	120	±6	35

Для рисунка 2 значение a принять равным 40 мкм; n2, n3 определить из построенной модели в SolidWorks; bш шаг изменения переменной для определения ёмкости в программе MathCad 14 принять равным 0,1 мкм.

Таблица 2 Размеры (по вариантам) ГС тип 3 (рисунок 4)

№	d1, мкм	d2, мкм	$\Delta d_{1,2}$, мкм	p, мкм	t, мкм	b0, мкм	nm=nb
1	3	8	± 2	3	5	50	50
2	4	9	± 3	4	6	60	45
3	5	10	± 4	5	7	70	40
4	6	11	± 2	6	8	80	35
5	7	12	± 3	7	9	90	30
6	3	8	± 2	8	10	100	25
7	4	9	± 3	9	5	110	20
8	5	10	± 4	3	6	50	50
9	6	11	± 2	4	7	60	45
10	7	12	± 3	5	8	70	40
11	3	8	± 2	6	9	80	35
12	4	9	± 3	7	10	90	30
13	5	10	± 4	8	5	100	25
14	6	11	± 2	9	6	110	20
15	7	12	± 3	3	7	50	50
16	3	8	± 2	4	8	60	45
17	4	9	± 3	5	9	70	40
18	5	10	± 4	6	10	80	35
19	6	11	± 2	7	5	90	30
20	7	12	± 3	8	6	100	25
21	3	8	± 2	9	7	110	20
22	4	9	± 3	3	8	50	50
23	5	10	± 4	4	9	60	45
24	6	11	± 2	5	10	70	40

Для рисунка 4 значение a принять равным 40 мкм; значения n3, n4 определить из построенной модели в SolidWorks; bш шаг изменения переменной для определения ёмкости в программе MathCad 14 принять равным 0,1 мкм.

Таблица 3 Размеры (по вариантам) ГС RR-гироскопа (рисунок 7)

№	$\Delta\theta$, град	d0, мкм	φ_0 , град	$\Delta\varphi$, град	d, мкм	t, мкм	p, мкм	n1
1	$\pm 0,5$	5	100	± 1	7	5	9	10
2	$\pm 0,6$	6	90	$\pm 1,5$	6	6	8	13
3	$\pm 0,7$	7	80	± 2	5	7	7	17
4	$\pm 0,8$	8	70	$\pm 2,5$	4	8	6	20
5	$\pm 0,5$	5	60	± 3	3	9	5	23
6	$\pm 0,6$	6	50	± 1	7	10	4	26
7	$\pm 0,7$	7	100	$\pm 1,5$	6	5	9	10
8	$\pm 0,8$	8	90	± 2	5	6	8	13
9	$\pm 0,5$	5	80	$\pm 2,5$	4	7	7	17
10	$\pm 0,6$	6	70	± 3	3	8	6	20
11	$\pm 0,7$	7	60	± 1	7	9	5	23
12	$\pm 0,8$	8	50	$\pm 1,5$	6	10	4	26
13	$\pm 0,5$	5	100	± 2	5	5	9	10
14	$\pm 0,6$	6	90	$\pm 2,5$	4	6	8	13
15	$\pm 0,7$	7	80	± 3	3	7	7	17
16	$\pm 0,8$	8	70	± 1	7	8	6	20
17	$\pm 0,5$	5	60	$\pm 1,5$	6	9	5	23
18	$\pm 0,6$	6	50	± 2	5	10	4	26
19	$\pm 0,7$	7	100	$\pm 2,5$	4	5	9	10
20	$\pm 0,8$	8	90	± 3	3	6	8	13
21	$\pm 0,5$	5	80	± 1	7	7	7	17
22	$\pm 0,6$	6	70	$\pm 1,5$	6	8	6	20
23	$\pm 0,7$	7	60	± 2	5	9	5	23
24	$\pm 0,8$	8	50	$\pm 2,5$	4	10	4	26

Для рисунка 7 значение b принять равным 40 мкм; r принять равным 50 мкм; значения n2, n3 определить из построенной модели в SolidWorks; bш шаг изменения переменной для определения ёмкости в программе MathCad 14 принять равным 0,05 град.

Содержание отчёта:

1. Цель.
2. 3D-модели ГС.
3. Определённые параметры из SolidWorks.
4. Зависимости изменения ёмкостей ГС от их перемещения используя формулу определения ёмкости с учётом краевых эффектов.
5. Выводы.