

## 5 ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 5.1 Расчет емкостного преобразователя перемещения

Емкостной преобразователь перемещения изображен на рис.5.1.

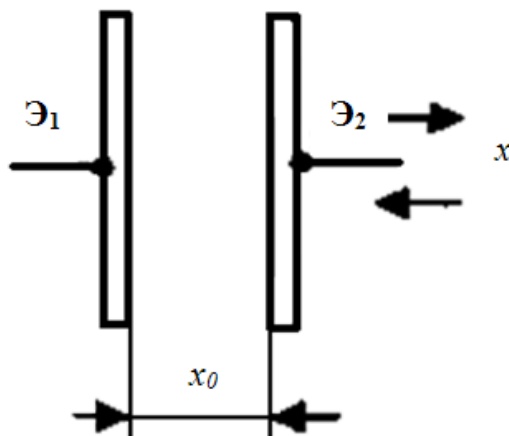


Рис.5.1. Схема емкостного преобразователя перемещения

При расчетах емкостных преобразователей с изменением воздушного зазора  $x$  между электродами электрода Э1 и Э2 можно воспользоваться следующими соотношениями.

1. Электрическая емкость преобразователя

$$C_x = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot F}{x}, \quad (5.1)$$

где  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,842 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  
 $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха  $\varepsilon_B=1$ );  
 $F$  - площадь перекрытия пластин (электродов).

2. Чувствительность преобразователя:

$$S_x = \frac{dC_x}{dx} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon F}{x^2}. \quad (5.2)$$

3. Электрическое сопротивление преобразователя:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_x} = \frac{x}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon F}. \quad (5.3)$$

## 5.2 Расчет емкостного преобразователя толщины

Емкостной преобразователь толщины диэлектрической ленты изображен на рис.5.2.

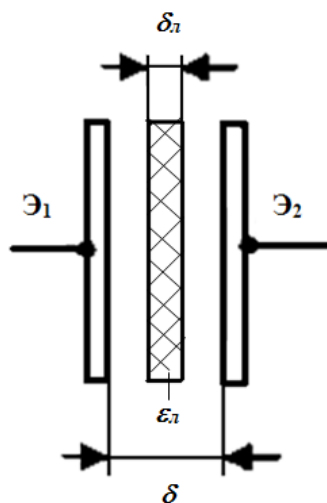


Рис.5.2. Схема емкостного преобразователя толщины диэлектрической ленты

При расчетах емкостных преобразователей для измерения толщины диэлектрической ленты можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$C_{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon F}{\delta - \delta_l (1 - 1/\varepsilon_l)}; \quad (5.4)$$

$$S_{\delta} = \frac{\varepsilon_0 F (\varepsilon_l - 1)}{\varepsilon_l (\delta - \delta_l (1 - 1/\varepsilon_l))^2}; \quad (5.5)$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_{\delta}}. \quad (5.6)$$

где  $C_{\delta}, S_{\delta}, X_c$  - значение емкости, чувствительность и электрическое сопротивление преобразователя;  $F$  - площадь пластин преобразователя;  $\delta, \delta_l$  - зазор между пластинами и толщина диэлектрической ленты, соответственно;  $\varepsilon_l$  - относительная диэлектрическая проницаемость ленты;  $f$  - частота напряжения питания.

### 5.3 Примеры расчетов и варианты заданий

**Пример 5.3.1.** Рассчитать емкостной преобразователь перемещения со следующими параметрами: диаметр пластин  $D=2$  см, начальный зазор  $\delta_0 = 0,5$  мм, максимальное перемещение подвижной пластины  $(\delta_0+x)=x_m=10$  мм, частота питающего напряжения  $f=0,5$  МГц. Построить графики  $C_x, S_x, X_c$  в зависимости от текущего значения  $x$  с шагом порядка 1 мм.

Подставляя в (5.1) исходные данные, получим (для  $x=x_m$ ):

$$C_x = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \pi D^2}{4}}{x} = \frac{8.842 * 10^{-12} * 1 * \pi * \frac{(2 * 10^{-2})^2}{4}}{10 * 10^{-3}} = 0.278 * 10^{-12} \text{ Ф} = 0.278 \text{ пФ}.$$

По формуле (5.2) определяем чувствительность преобразователя

$$S_x = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \pi D^2}{4}}{x^2} = \frac{8.842 * 10^{-12} * 1 * \pi * \frac{(2 * 10^{-2})^2}{4}}{(10 * 10^{-3})^2} = 27.8 * \frac{10^{-12} \text{ Ф}}{\text{м}} = 27,8 \frac{\text{пФ}}{\text{м}} = 0,0278 \text{ пФ/мм}.$$

Электрическое сопротивление преобразователя определяем по формуле (5.3):

$$X_c = \frac{x}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \pi D^2 / 4} = \frac{10 * 10^{-3}}{2\pi * 0.5 * 10^6 * 8.842 * 10^{-12} * 1 * \pi * (2 * 10^{-2})^2 / 4} = 1146 * 10^3 \text{ Ом} = 1146 \text{ кОм}.$$

Аналогично произведем расчет для других значений  $x$ , результаты расчетов сведем в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты расчетов

$x$ , мм	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_x$ , пФ	5,556	2,778	1,389	0,926	0,695	0,556	0,463	0,397	0,347	0,309	0,278
$S_x$ , пФ/мм	11,11	2,778	0,695	0,309	0,174	0,111	0,077	0,057	0,043	0,034	0,028
$X_c$ , кОм	57,295	115	229	344	458	573	688	802	917	1031	1146

По данным таблицы 5.1. построены графики зависимостей  $C_x, S_x, X_c$  от  $x$ , представленные на рис.5.2.а, б, в.

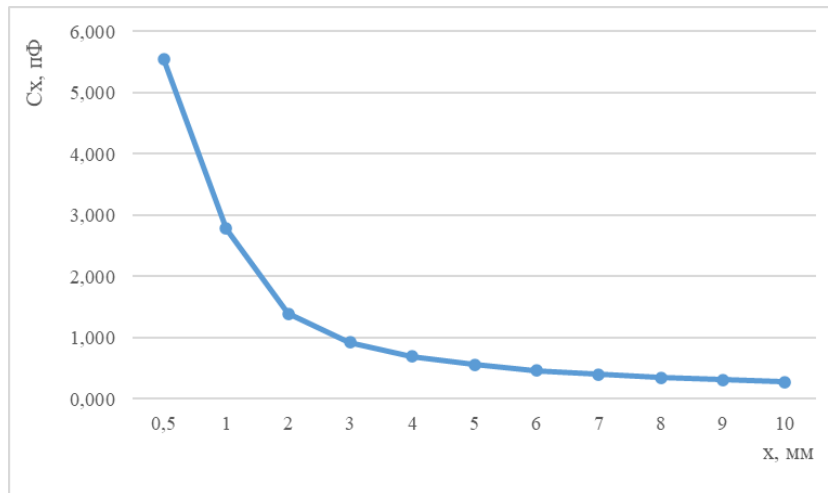


Рис.5.2.а. График зависимости  $C_x=f(x)$

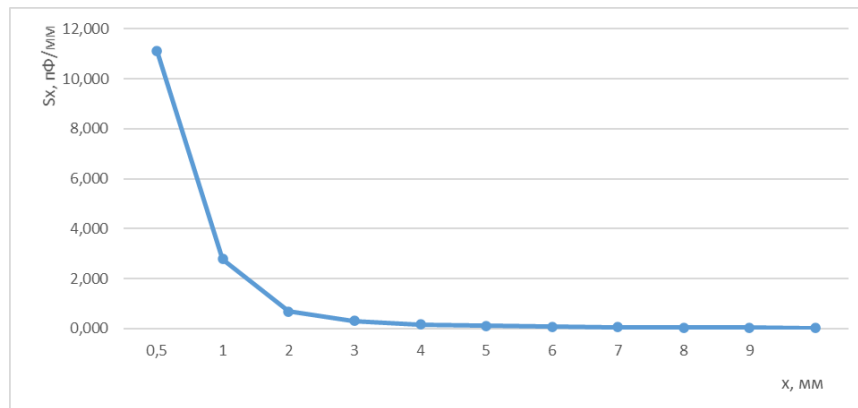


Рис.5.2.б. График зависимости  $S_x=f(x)$

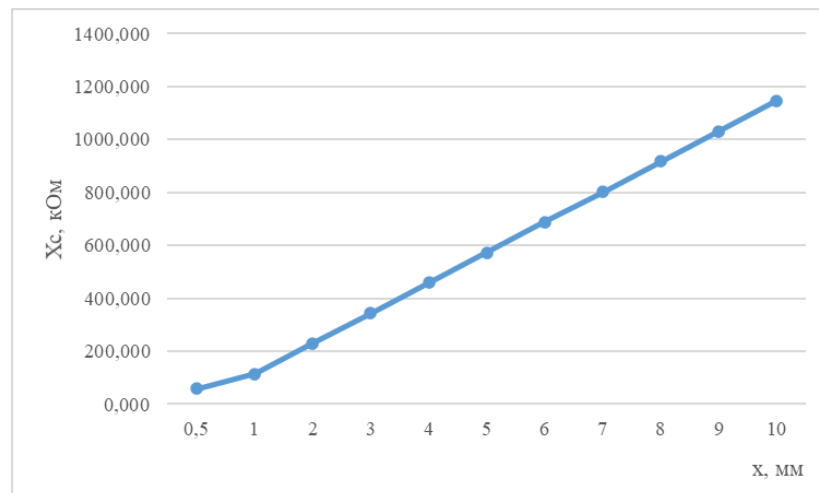


Рис.5.2.в. График зависимости  $X_c=f(x)$

**Пример 5.3.2.** Рассчитать емкостный преобразователь для измерения толщины ленты из диэлектрического материала с  $\varepsilon_l=2,5$ . Преобразователь состоит из двух неподвижных пластин с площадью перекрытия  $F=200 \text{ см}^2$ , между которыми перемещается лента толщиной  $\delta_l=1 \text{ мм}$ . Расстояние между пластинами  $\delta=3 \text{ мм}$ . Частота питающего напряжения  $f=0,5 \text{ МГц}$ .

Рассчитать и построить графики зависимости  $C_\delta, S_\delta, X_c$  от  $\delta_l$ , изменяющейся в диапазоне от 0 до 1 мм с шагом 0,1 мм.

Подставляя в выражения (5.4), (5.5), (5.6) исходные и расчетные данные, получим (принимая  $\delta = 1 \text{ мм}$ ):

$$C_\delta = \frac{8.842 * 10^{-12} * 200 * 10^{-4}}{3 * 10^{-3} - 1 * 10^{-3}(1 - 1/2.5)} = 73.68 * 10^{-12} \text{ Ф} = 73.68 \text{ пФ};$$

$$S_\delta = \frac{8.842 * 10^{-12} * 200 * 10^{-4} * (2.5 - 1)}{2.5 * (3 * 10^{-3} - 1 * 10^{-3}(1 - 1/2.5))^2} = 1.842 * 10^{-8} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} = 18,42 \frac{\text{пФ}}{\text{мм}};$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 0.5 * 10^6 * 73.68 * 10^{-12}} = 4320 \text{ Ом} = 4,320 \text{ кОм}.$$

Аналогично произведем расчет для других значений  $C_\delta, S_\delta, X_c$  от  $\delta_l$ , результаты расчетов сведем в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчетов

$\delta_l, \text{ мм}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$C_\delta, \text{ пФ}$	58,9	60,1	61,4	62,7	64,1	65,5	67,0	68,5	70,2	71,9	73,7
$S_\delta, \text{ пФ/мм}$	11,8	12,3	12,8	13,3	13,9	14	6	15,2	16,6	17,7	18,4
$X_c, \text{ кОм}$	5,4	5,29	5,18	5,08	4,97	4,86	4,75	4,64	4,54	4,43	4,32

По данным таблицы 5.2 построены графики зависимостей  $C_\delta, S_\delta, X_c$  от  $\delta_l$ , приведенные на рис.5.4.а, б, в.

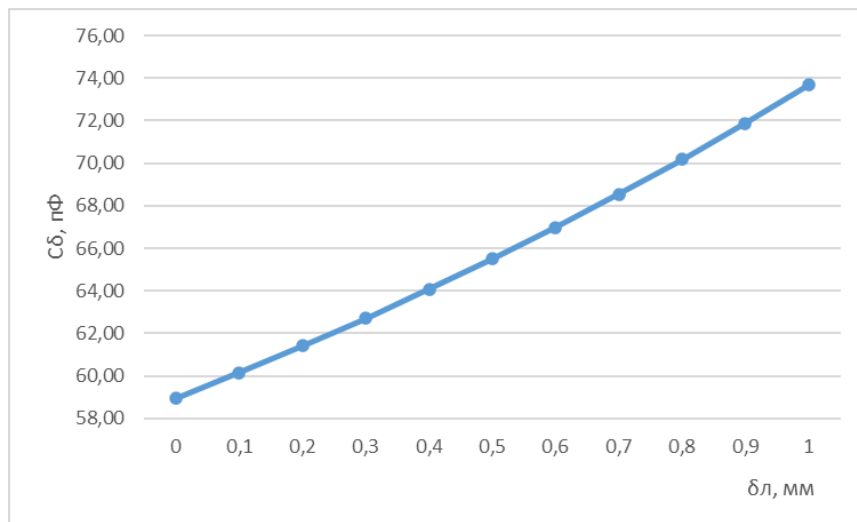


Рис.5.4.а. График зависимости  $C_\delta = f(\delta_l)$

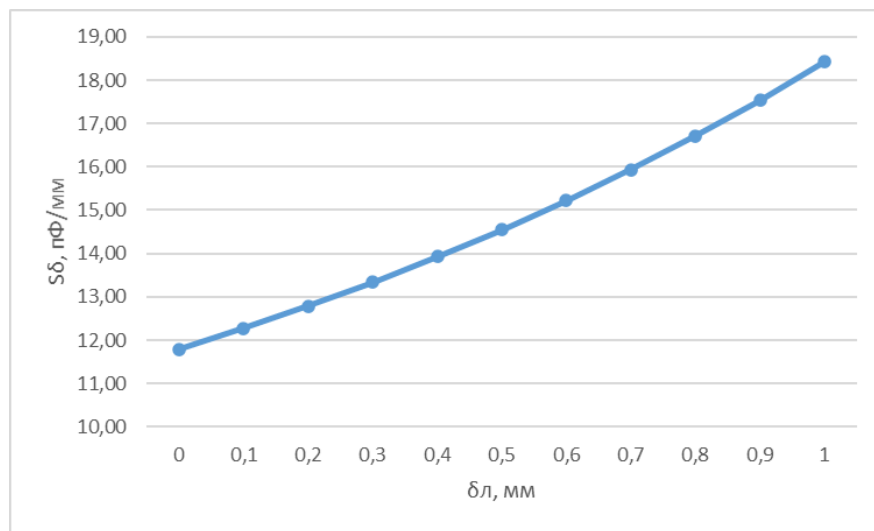


Рис.5.4.б. График зависимости  $S_\delta = f(\delta_l)$

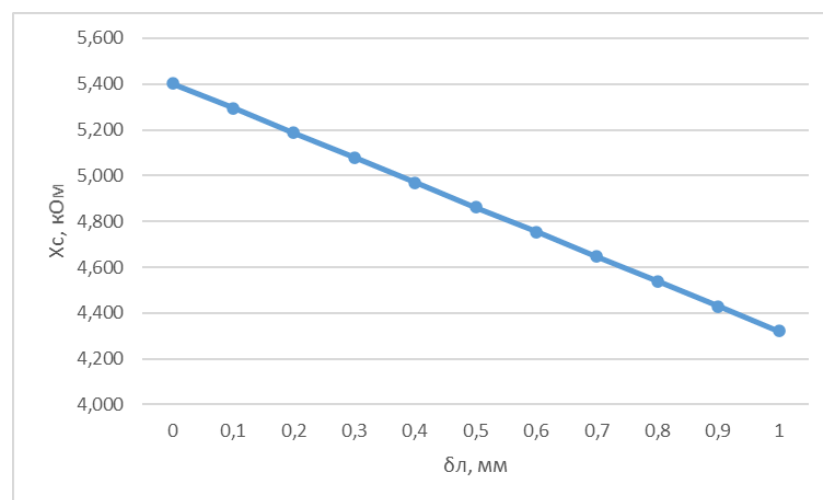


Рис.5.4.в. График зависимости  $X_c = f(\delta_l)$

Варианты заданий к п. 5.3.1 приведены в таблице 5.3.

Варианты заданий к п. 5.3.2 приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.3. Варианты заданий к п. 5.3.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$D$ , мм	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	10	15	10
$\delta_m$ , мм	0,5	0,5	1	10	2,0	1,0	1,0	5,0	6,0	10,0	1,0	1,0	0,5
$f$ , МГц	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	1,5	2,0	1,5	1,0	2,0
$x$ , мм	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	3,0
№	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$D$ , мм	20	25	30	10	15	20	25	30	15	30	50	50	70
$\delta_m$ , мм	5	4	10	1,0	1,0	2,0	3,0	5	10	10	20	30	40
$f$ , МГц	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,1	0,5	0,2	3	3	1,5
$x$ , мм	0,5	0,5	1,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0	4	4

Таблица 5.4 Варианты заданий к п. 5.3.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$F$ , см <sup>2</sup>	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	70	70	70
$\delta$ , мм	5	10	5	20	25	5	10	15	20	25	10	15	20
$f$ , МГц	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05
Измерение толщины ленты, $\epsilon_l=2,5$													
$\delta_l$	2	5	5	10	15	0,5	0,5	0,8	3	5	3	5	8
Измерение диэлектрической проницаемости, $\delta_l=0,1$ мм													
$\epsilon_l$	1,5	2	2,5	3	4,5	2	4	3	2	2,5	3	4	8
№	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$F$ , см <sup>2</sup>	30	70	70	100	100	100	50	50	50	100	100	100	100
$\delta$ , мм	25	25	30	15	10	25	20	30	5	10	15	25	30
$f$ , МГц	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Измерение толщины ленты, $\epsilon_l=2,5$													
$\delta_l$	5	6	10	15	10	5	10	0,1	0,5	1,0	3	5	15
Измерение диэлектрической проницаемости, $\delta_l=0,1$ мм													
$\epsilon_l$	2	4	5	7	6	4	3	2,5	3	1,5	6	2,2	3