

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВЫ РАСЧЕТА РЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	5
1.1. Расчет резистивных преобразователей линейного перемещения	5
1.2. Примеры расчета и варианты заданий	7
2. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	10
2.1. Расчет тензорезистивного преобразователя массы	10
2.2. Примеры расчета и варианты заданий	11
3. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	13
3.1. Расчет преобразователя температуры в электрический сигнал	13
3.2. Примеры расчета и варианты заданий	15
4. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	17
4.1. Расчет плотности и величины заряда на гранях пьезоэлементов	17
4.2. Расчет пьезоэлектрического преобразователя	20
4.3. Расчет термочувствительного пьезорезонансного преобразователя	21
4.4. Примеры расчета и варианты заданий	22
5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	24
5.1. Расчет емкостного преобразователя перемещения	24
5.2. Расчет емкостного преобразователя толщины	24
5.3. Расчет емкостного преобразователя влажности	25
5.4. Примеры расчетов и варианты заданий	26
6. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	32
6.1. Расчет преобразователя Холла	32
6.2. Примеры расчета и варианты заданий	34
7. ОСНОВЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ	35

8. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	37
9. АНАЛИЗ ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ЦЕПЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ	44
9.1. Обобщенная информационная модель получения и передачи информации	44
9.2. Критерии выявления величин и параметров	45
9.3. Величины и параметры цепей различной природы	47
9.4. Пример расчета и варианты заданий	51
10. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ДЛЯ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	51
10.1. Эквивалентные электрические схемы	51
10.2. Эквивалентные схемы электромеханических преобразователей с электромагнитной связью	53
10.3. Эквивалентная схема поляризованного электромагнитного преобразователя	57
10.4. Эквивалентная схема поляризованного электростатического преобразователя	58
10.5. Пример расчета и варианты заданий	59
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	63
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	63

## ВВЕДЕНИЕ

Практические занятия по дисциплине «Физические основы получения информации» являются важным этапом изучения физических основ и методов расчета измерительных преобразователей величин различной физической природы.

### 1. ОСНОВЫ РАСЧЕТА РЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

#### 1.1. Расчет резистивных преобразователей линейного перемещения

Резистивный преобразователь линейного перемещения изображен на рис.1.1.

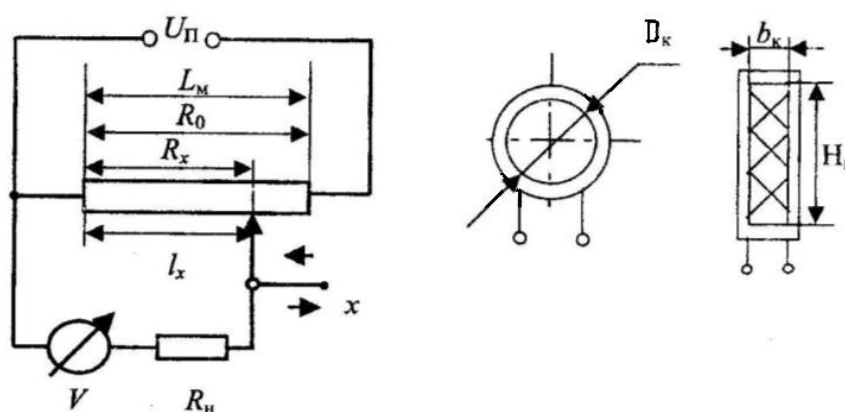


Рис.1.1. Схема резистивного преобразователя линейного перемещения

Целью расчетов таких преобразователей является определение геометрических размеров, выбор материалов motочных данных и погрешностей. Существуют различные подходы к расчетам в зависимости от поставленной задачи. Один из вариантов расчета заключается в следующем. Задается напряжение источника питания  $U_{\text{п}}$ , В; полное сопротивление  $R_0$ , Ом; максимальное перемещение движка  $L_M$ , мм; плотность тока в проводе  $j$ , А/мм<sup>2</sup>; материал проводника с  $\rho$ ,  $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$ ; сопротивление нагрузки реостата  $R_{\text{н}}$ , Ом.

Методика расчета заключается в следующем

1. Определяется диаметр голого провода по формуле:

$$d_0 \geq \sqrt{\frac{U_{\text{п}}}{\pi \cdot j \cdot R_0}}, \text{ мм.} \quad (1.1)$$

Диаметр провода с изоляцией  $d_1$  определяется из таблицы 1.1.

Таблица 1.1 – Диаметры проводов с изоляцией

$d_0$	$d_1$	$d_0$	$d_1$	$d_0$	$d_1$
0,06	0,075	0,12	0,140	0,18	0,205
0,07	0,085	0,13	0,150	0,19	0,215
0,08	0,095	0,14	0,160	0,20	0,225
0,09	0,105	0,15	0,170	0,25	0,280
0,10	0,120	0,16	0,185	0,31	0,340
0,11	0,130	0,17	0,195	0,35	0,385

2. Определяется сечение голого провода:

$$q_0 = 0,25\pi d^2, \text{ мм}^2. \quad (1.2)$$

3. Длина провода рассчитывается по формуле:

$$l_n = \frac{R_0 q_0}{\rho}, \text{ м}. \quad (1.3)$$

4. Определяется число витков катушки преобразователя:

$$w = \frac{L_M}{d_1}. \quad (1.4)$$

5. Средняя длина витка:

$$l_B = \frac{l_n}{w} 10^3, \text{ мм}. \quad (1.5)$$

6. Диаметр цилиндрического каркаса преобразователя:

$$D_K = \frac{l_B}{\pi} - d_1, \text{ мм}. \quad (1.6)$$

7. Размеры пластинчатого каркаса (сечение узкое прямоугольное) с шириной каркаса  $b_K$ , мм и высотой  $H_K$ , мм:

$$H_K = \frac{l_B}{2} - b_K. \quad (1.7)$$

8. Погрешность ступенчатости (разрешающая способность):

$$\delta_p = \frac{U_{II}}{w}, \text{ В}. \quad (1.8)$$

9. Относительная погрешность

$$\gamma = \frac{\delta_p}{U_{II}} \cdot 100\%. \quad 1.9$$

Для расчета электрической части такого преобразователя с целью определения выходного напряжения (для

потенциометрической схемы включения (рис.1.1))  $U_{\Pi}$ , абсолютной  $\Delta U$  и относительной погрешности нелинейности  $\delta_H$  статистической характеристики рекомендуется следующая последовательность расчетов и расчетные формулы (при этом указывается сопротивление нагрузки  $R_H$  – внутреннее сопротивление вольтметра).

1. Выходное напряжение на нагрузке  $U_{ВН}$  определяется по формуле:

$$U_{ВН} = U_{\Pi} \frac{m}{1 + km} \frac{1 - m}{1 - m}, \text{ В}, \quad (1.10)$$

где  $m = \frac{R_x}{R_0}$ ;  $k = \frac{R_0}{R_H}$ ;  $R_0$  – полное сопротивление преобразователя;  $R_x$  – сопротивление участка, пропорциональное перемещению движка  $x$ .

2. Абсолютная погрешность нелинейности  $\Delta U_x$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta U_x = U_{ВН} - U_{ВН,ХХ}, \text{ В}, \quad (1.11)$$

где  $U_{ВН,ХХ}$  - напряжение на нагрузке при  $R_H = \infty$  (режим холостого хода).

3. Относительная приведенная погрешность нелинейности определяется по формуле:

$$\delta_H = \frac{\Delta U_x}{U_{\Pi}} = - \frac{km^2}{1 + km} \frac{1 - m}{1 - m} \cdot 100\% \quad (1.12)$$

## 1.2. Примеры расчета и варианты заданий

**Пример 1.2.1.** Требуется рассчитать резистивный преобразователь линейного перемещения. Заданы: напряжение источника питания  $U_{\Pi}=10$  В, сопротивление преобразователя  $R_0=1000$  Ом, максимальное перемещение движка  $L_M=50$  мм, плотность тока в проводе  $j=2$  А/мм<sup>2</sup>, материал проводника - константан  $\rho=0,48 \frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$ .

Подставляя исходные данные в формулы (1.1) - (1.9), получим:

$$d_0 \geq \sqrt{\frac{U_{\Pi}}{\pi \cdot j \cdot R_0}} \approx 0,08 \text{ мм}; q_0 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 0,08^2 = 0,00503 \text{ мм}^2;$$

$$l_n = \frac{1000 \cdot 0,00503}{0,48} \approx 10,5 \text{ м}; w = \frac{50}{0,095} = 526 \text{ витков};$$

$$l_B = \frac{10,5}{526} \approx 0,0200 \text{ м} = 20 \text{ мм};$$

$$D_k = \frac{20}{3,14} - 0,095 = 6,27 \text{ мм}; H = \frac{20}{2} - 1 = 9 \text{ мм};$$

(здесь ширина каркаса  $b = 1$  мм);

$$\delta_p = \frac{10}{526} = 0,019 \text{ В}; \gamma = \frac{0,019}{10} 100\% = 0,19\%.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты расчетов

$d_0$	$q_0$	$l_n$	$w$	$l_b$	$D_k$	$H$	$\delta_p$	$\gamma$
мм	мм <sup>2</sup>	м	ВИТКИ	мм	мм	мм	В	%
0,08	$5,03 \cdot 10^{-3}$	10,5	526	20	6,27	9	0,019	0,19

**Пример 1.2.2.** Резистивный преобразователь включен по потенциометрической схеме. По данным расчетов примера 1.2.1 рассчитать выходное напряжение  $U_{вн}$ , абсолютную  $\Delta U_x$  и относительную  $\delta_n$  погрешности нелинейности. Дополнительно задано сопротивление нагрузки  $R_n = 400$  Ом.

Расчет преобразователя проведем с использованием формул (1.10) – (1.12). Подставляя исходные данные (например, при  $R_x=500$  Ом), получим  $m = 500/1000=0,5$ ;  $k = 1000/400 = 2,5$ . В точке  $m = 0,5$  выходное напряжение

$$U_{вн0,5} = 10 \cdot \frac{0,5}{1 + 2,5 \cdot 0,5} \cdot \frac{1}{1 - 0,5} \approx 3,08 \text{ В}.$$

Значение выходного напряжения  $U_{вн}$  в зависимости от  $m$  рассчитано для  $m=0 \div 1$  с шагом дискретизации  $\Delta m = 0,1$ . Результаты расчетов сведены в таблицу 1.3. График  $U_{вн} = f(m)$  представлен на рис.1.2.

Таблица 1.3 – Зависимость  $U_{вн} = f(m)$

$m$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$U_{вн}, \text{В}$	0	0,82	1,43	2,31	2,5	3,08	3,75	4,59	5,7	7,35	10

Абсолютная погрешность рассчитывается по формуле (1.11) для  $U_{вн.хх}$  в диапазоне от 0 до 10 В с шагом дискретизации  $\Delta_{вн} = 1$  В. Напряжение  $U_{вн}$  выбирается из таблицы 1.3. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.4. Относительная приведенная погрешность нелинейности  $\delta_n$  рассчитывается по формуле (1.12) при  $k = 2,5$  и  $m$  в пределах  $m=0 \div 1$  с шагом дискретизации  $\Delta m = 0,1$ . Результаты расчетов сведены в таблицу 1.4. График зависимости  $\delta_n = f(m)$  представлен на рисунке. 1.3.

Таблица 1.4 – Результаты расчетов погрешностей

$U_{ВН,XX}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{В,Н}$	0	0,82	1,43	2,31	2,5	3,08	3,75	4,59	5,7	7,35	10
$\Delta U_x$	0	0,18	0,57	0,69	1,5	1,92	2,25	2,41	2,3	1,65	0
$-\delta_H, \%$	0	2	6	10	15	19	23	24	23	17	0

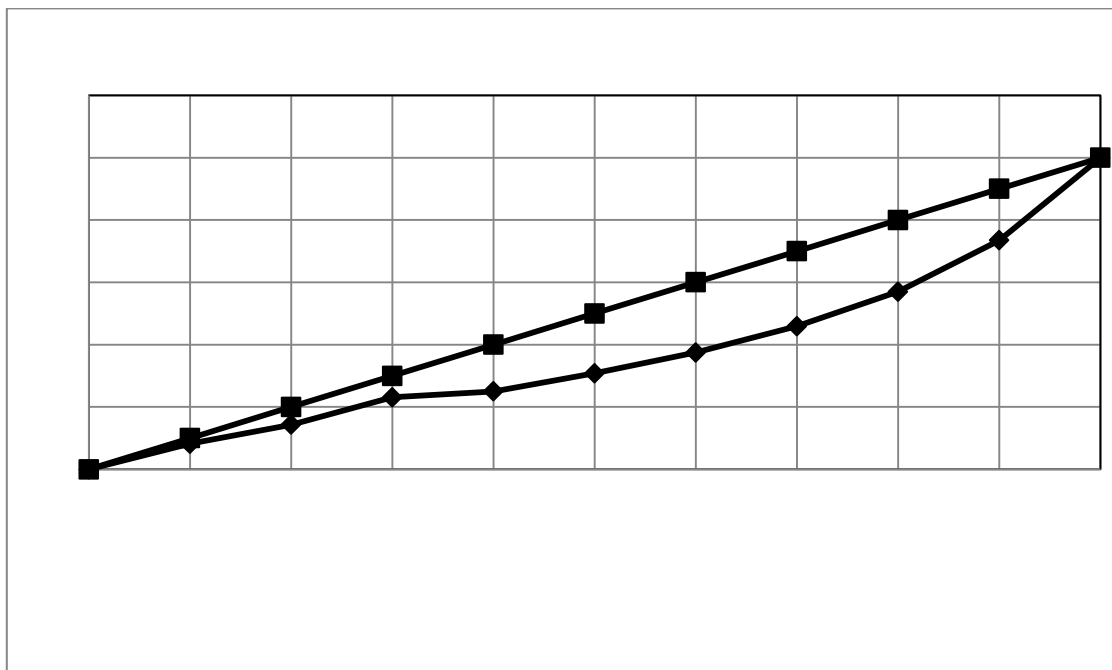


Рис.1.2. График зависимости  $U_{вн} = f(m)$

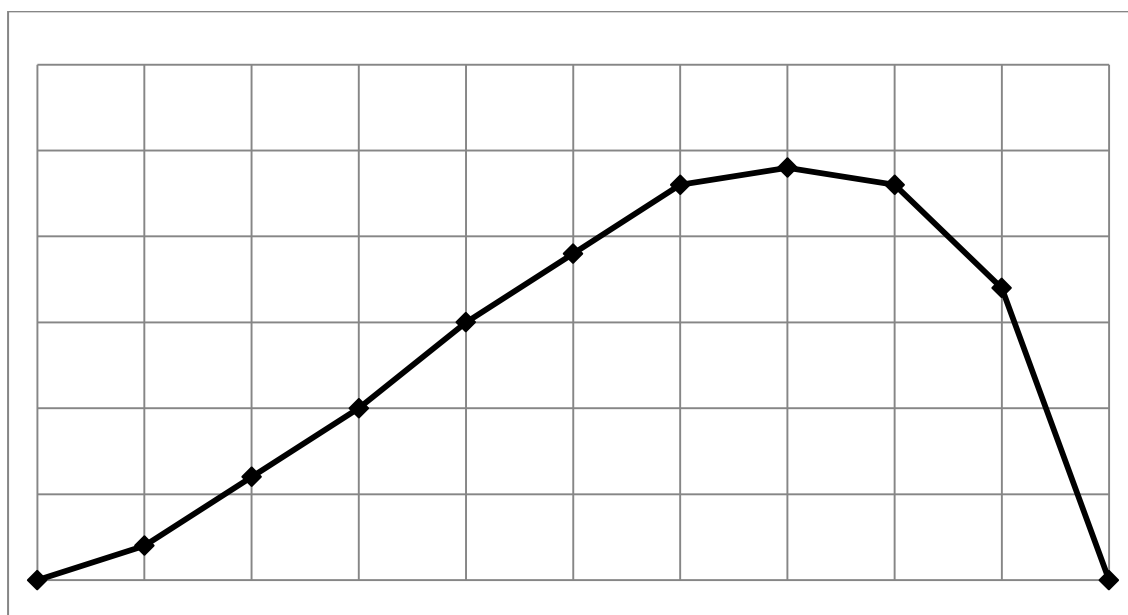


Рис.1.3. График зависимости  $\delta_H = f(m)$

Варианты заданий к п.1 приведены в Приложении 1.

## 2. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 2.1. Расчет тензорезистивного преобразователя массы

Тензорезистивный преобразователь массы изображен на рис.2.1.

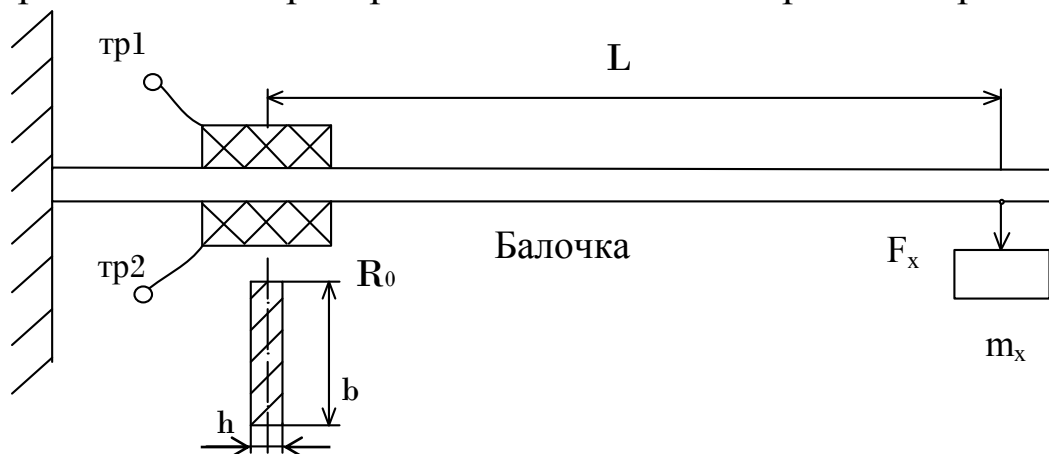


Рис.2.1. Схема тензорезистивного преобразователя массы

Целью расчетов тензорезистивных преобразователей массы является расчет механической части - измерительной консольной балочки, с помощью которой измеряемая масса преобразуется в относительную механическую деформацию; деформация преобразуется в изменение сопротивления тензорезистора и далее с помощью измерительной мостовой схемы изменение сопротивления преобразуется в электрическое напряжение.

Один из вариантов расчетов проводится в следующем порядке.

1. Выбирается тип тензорезисторов и их основные параметры: коэффициент тензочувствительности  $k$ , сопротивление  $R_0$ , допустимый ток  $I_{\max}$  и база  $l_q$ .

2. Производится пересчет массы  $m_x$  (кг) в силу  $F_x$  (Н) ( $g$  – ускорение свободного падения):

$$F_x = g \cdot m_x.$$

3. Выбирается материал измерительной балочки (обычно высококачественная сталь с допустимым механическим напряжением  $\sigma_{\text{доп}} = 10 \text{ кг/мм}^2$  и модулем упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ н/мм}^2$ ).

4. Задаются механические параметры балочки:  $b$  - ширина, мм,  $h$  - толщина, мм.

5. Рассчитывается момент сопротивления изгибу балочки  $W=b \cdot h^2/6$ , мм<sup>3</sup>.

6. Определяется длина балочки  $L$  (от середины тензорезистора в месте приклейки до точки приложения массы) по формулам:

$$\delta = \frac{F \cdot L}{W}; L = \frac{\delta_{\text{доп}} \cdot W}{F_{x \text{ max}}}, \text{ мм.}$$

7. Рассчитывается относительная максимальная деформация:

$$\varepsilon_{\delta \text{ max}} = \frac{\delta_{\text{доп}}}{E}.$$

8. Рассчитывается относительное максимальное изменение сопротивления тензорезистора:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon_{\delta \text{ max}}$$

9. Определяется напряжение питания мостовой измерительной схемы с двумя активными плечами:

$$U_{\text{п}} = 2I_{\text{max}} \cdot R_0, \text{ В.}$$

10. Выходное напряжение мостовой схемы (для случая равноплечего моста) при двух активных плечах:

$$U_{\text{м вых max}} = \frac{U_{\text{п}}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R_0}, \text{ В.}$$

11. Для расчета выходного напряжения моста в зависимости от текущего значения массы следует воспользоваться формулой:

$$U_{\text{м вых}} = g \cdot \frac{U_{\text{п}}}{2} \cdot k \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{L}{W} m_x, \text{ В,}$$

полученной путем пересчета значения массы к формуле  $U_{\text{м вых}}$ .

## 2.2. Примеры расчета и варианты заданий

**Пример 2.2.1.** Дано:  $m_{x \text{ max}} = 15$  кг; материал балочки – сталь; размеры прямоугольной балочки:  $b = 40$  мм (ширина),  $h = 4$  мм (толщина) в месте расположения тензодатчика; тензодатчик типа 2ПКП-20-20 (база 20 мм,  $R_0 = 200$  Ом,  $I_{\text{max}} = 30$  мА,  $k=2$ ).

Расчет производится в следующей последовательности:

1. Определяем силу  $F_{x \text{ max}}$ , действующую на балочку под весом  $m_{x \text{ max}} = 15$  кг,  $F_{x \text{ max}} = g \cdot m_x = 9,81 \cdot 15 = 147,15$  Н.

2. В качестве материала балочки выбираем высококачественную сталь с параметрами  $\sigma_{\text{доп.}} = 100$  Н/мм<sup>2</sup> и  $E = 2,1 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>.

3. Рассчитываем момент сопротивления изгибу балочки по формуле:

$$W = b \cdot h^2 / 6 = 40 \cdot 4^2 / 6 = 106,7 \text{ мм}^3.$$

4. Определяем длину балочки по формуле:

$$L = \frac{\sigma_{\text{доп}} \cdot W}{F_{x \text{ max}}} = \frac{100 \cdot 106,7}{147,15} = 72,5 \text{ мм}$$

5. Определяем относительную максимальную деформацию балочки:

$$\varepsilon_{\delta \text{ max}} = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{E} = \frac{100}{2,1 \cdot 10^5} = 47,6 \cdot 10^{-5}.$$

6. Рассчитываем максимальное относительное изменение сопротивления преобразователя

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon_{\delta \text{ max}} = 2 \cdot 47,6 \cdot 10^{-5} = 9,52 \cdot 10^{-4}.$$

7. Определяем напряжение питания  $U_{\text{п}}$  равноплечего моста с двумя активными плечами (полумост) по формуле:

$$U_{\text{п}} = 2 \cdot I_{\text{max}} \cdot R_0 = 2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 200 = 12 \text{ В.}$$

8. Напряжение на выходе моста  $U_{\text{м max}}$ :

$$U_{\text{м max}} = \frac{U_{\text{п}}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{12}{2} \cdot 9,52 \cdot 10^{-4} = 57,1 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 5,71 \text{ мВ.}$$

9. Для расчетов текущих значений  $U_{\text{м вых}}$  в зависимости от массы  $m_x$  для удобства расчетов можно воспользоваться формулой:

$$U_{\text{м вых}} = g \cdot \frac{U_{\text{п}}}{2} \cdot k \cdot \frac{L}{E \cdot W} \cdot m_x = 9,81 \cdot \frac{12}{2} \cdot 2 \cdot \frac{72,5 \cdot 10^{-3}}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 106,7 \cdot 10^{-3}} \cdot m_x = 0,38 \cdot 10^{-3} m_x ,$$

полученной путем приведения значения  $m_x$  к формуле для  $U_{\text{м.вых.}}$ .

10. Результаты расчетов целесообразно свести в таблицу 2.1, задаваясь шагом дискретизации  $\Delta m_x = 2 \text{ кг}$  в пределах от 0 до  $m_{x \text{ max}} = 15 \text{ кг}$ .

Таблица 2.1 – Результаты расчетов

$m_x$	кг	0	2	4	6	8	10	12	14	15
$U_{\text{м.вых}}$	мВ	0	0,76	1,52	2,28	3,04	3,8	4,56	5,32	5,7

11. По результатам расчетов построить график зависимости  $U_{\text{м вых}} = f(m_x)$ .

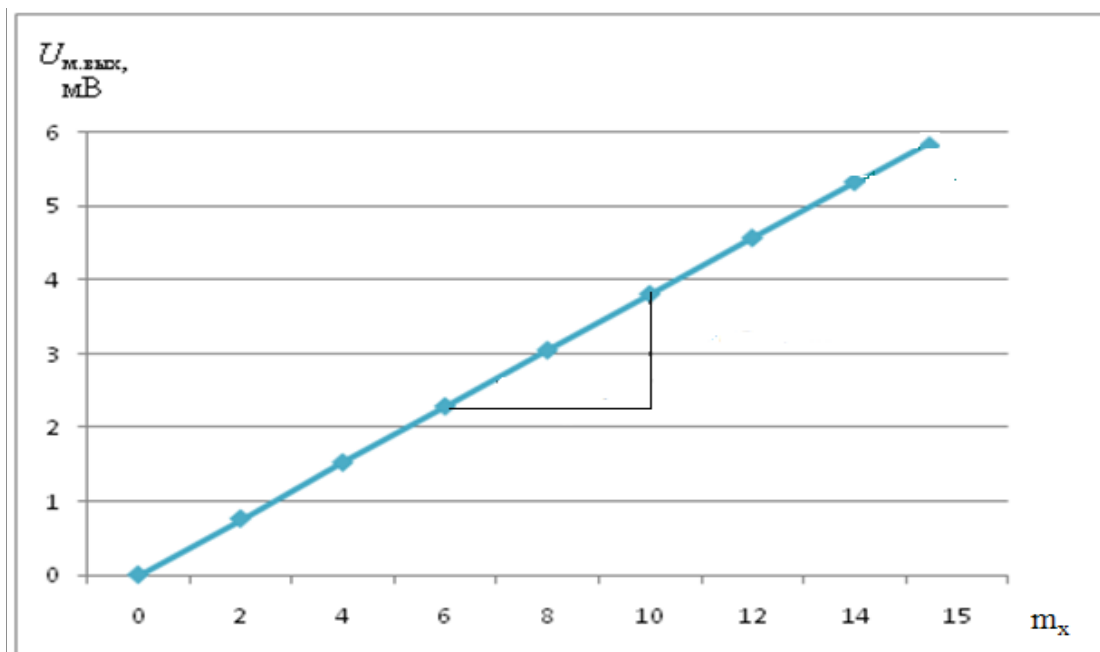


Рис.2.1. Зависимость выходного напряжения от нагрузки

Чувствительность преобразователя:

$$S = \frac{\Delta U_{m.вых.}}{\Delta m_x} = \frac{1.52}{4} = 0,38 \frac{\text{мВ}}{\text{кг}} = const.$$

Варианты заданий к п.2 приведены в Приложении 2.

### 3. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

#### 3.1. Расчет преобразователя температуры в электрический сигнал

Преобразование температуры в электрический сигнал производится, как правило, с помощью термоэлектрических преобразователей (термопар) в термо-ЭДС или терморезистивных преобразователей в изменение электрического сопротивления.

Развиваемое значение термо-ЭДС на зажимах термопары определяется как разность термо-ЭДС горячего (рабочего) и холодного спая (свободных концов):  $E_{ТП} = E_{гс} - E_{хс}$ .

В таблице 3.1 приведены зависимости термо-ЭДС  $E_{\theta_0}$  от температуры  $E_{\theta_0} = f(\theta)$  для различного вида термопар при температуре холодного спая равной нулю ( $\theta_{хс} = 0^\circ\text{C}$ ). В общем случае эти зависимости нелинейные, поэтому каждый участок зависимости

аппроксимируется прямой со своим углом наклона, тангенс которого определяется выражением:

$$(E_{\text{ТВ}} - E_{\text{ТН}})/(\theta_{\text{ТВ}} - \theta_{\text{ТН}}),$$

где  $E_{\text{ТВ}}, E_{\text{ТН}}, \theta_{\text{ТВ}}, \theta_{\text{ТН}}$  – соответственно верхние и нижние значения термо-ЭДС и температуры участка зависимости.

Таблица 3.1 – Термоэлектродвижущая сила термопар, мВ

°C	МК	ЖК	ХК	ХА	ПП
-20	-0,86	-1,05	-1,27	-0,77	-0,109
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,89	1,09	1,31	0,80	0,115
100	4,75	5,75	6,95	4,10	0,640
200	10,29	12,00	14,65	8,13	1,421
300	16,48	18,10	22,90	12,21	2,310
400	23,13	24,55	31,48	16,39	3,243
500	30,15	30,90	40,15	20,64	4,210
600	34,47	37,40	49,00	24,90	5,212
700	-	44,10	57,75	29,14	6,249
800	-	51,15	66,40	33,31	7,320
900	-	-	-	37,36	8,426
1000	-	-	-	41,31	9,566
1100	-	-	-	45,14	10,741
1200	-	-	-	48,85	11,950
1300	-	-	-	52,41	13,153
1400	-	-	-	-	14,356
1500	-	-	-	-	15,558
1600	-	-	-	-	16,760

МК: медь – копель; ЖК: железо – копель; ХК: хромель – копель; ХА: хромель – алюмель; ПП: платинородий – платина.

Градуировка термопар осуществляется при температуре свободных концов (холодного спая) равной нулю ( $\theta_{\text{xc}}=0^{\circ}\text{C}$ ). Если при эксплуатации термопары температура холодного спая будет отличаться от  $0^{\circ}\text{C}$  на величину  $+\theta_{\Delta}$ , то измеренная ЭДС будет меньше и необходимо ввести поправку в показания преобразователя. Однако из-за нелинейности зависимости поправка  $\Delta\theta$  к показаниям

измерителя термо-ЭДС (указателя)  $\theta_x'$ , градуированного непосредственно в градусах, не будет равна  $\theta_\Delta$ .

Можно поступить следующим образом. Вначале определяется поправка по термо-ЭДС  $\Delta E$ , которой соответствует значение температуры свободных концов  $\theta_{xc} = \theta_\Delta$  для участка зависимости, в котором находится значение  $\theta_{xc}$ :

$$\Delta E = E_{ТН} + \frac{E_{ТВ} - E_{ТН}}{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}} \theta_\Delta - \theta_{ТН} .$$

Далее аналогичным образом определяют значение термо-ЭДС, соответствующее показаниям указателя, для своего участка зависимости:

$$E_x' = E_{ТН} + \frac{E_{ТВ} - E_{ТН}}{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}} \theta_x' - \theta_{ТН} .$$

Затем вносят поправку к значению термо-ЭДС:

$$E_x = E_x' + \Delta E .$$

Наконец определяют «истинное» значение измеряемой температуры для соответствующего участка зависимости:

$$\theta_x = \theta_{ТН} + \frac{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}}{E_{ТВ} - E_{ТН}} E_x - E_{ТН} .$$

Если указатель проградуирован в единицах ЭДС (В), то необходимость определения значения  $E_x'$  отпадает.

Без введения поправки методическая погрешность в абсолютном выражении составит:  $\Delta_{мет} = \theta_x - \theta_x'$ , в относительном выражении:  $\delta_{мет} = \Delta_{мет} / \theta_x$ .

### 3.2. Примеры расчета и варианты заданий

**Пример 3.2.1.** Определить «истинную» температуру  $\theta_x$  и методическую погрешность, если указатель показал значение измеренной температуры термопарой ХА (хромель-алюмелевой)  $\theta_x' = 490^\circ\text{C}$  при температуре свободных концов  $\theta_{xc} = 40^\circ\text{C}$ .

Решение:

1. Определяем поправку по термо-ЭДС при  $\theta_{xc} = 40^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{ТН} + \frac{E_{ТВ} - E_{ТН}}{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}} \theta_\Delta - \theta_{ТН} = 0,80 + \frac{4,10 - 0,80}{100 - 20} 40 - 20 \\ &= 1,165 \text{ мВ}. \end{aligned}$$

2. Определяем значение термо-ЭДС, соответствующее показаниям указателя:

$$E_x' = E_{ТН} + \frac{E_{ТВ} - E_{ТН}}{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}} \theta_x' - \theta_{ТН} = 16,39 + \frac{20,64 - 16,39}{500 - 400} 490 - 400 = 20,215 \text{ мВ}$$

3. Вносим поправку к значению термо-ЭДС:

$$E_x = E_x' + \Delta E = 20,215 + 1,165 = 21,38 \text{ мВ.}$$

4. Определяем «истинное» значение измеряемой температуры:

$$\theta_x = \theta_{ТН} + \frac{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}}{E_{ТВ} - E_{ТН}} E_x - E_{ТН} = 500 + \frac{600 - 500}{24,90 - 20,64} 21,38 - 20,64 = 517,4 \text{ }^\circ\text{C.}$$

5. Без введения поправки методическая погрешность в абсолютном выражении составит:

$$\Delta_{\text{мет}} = \theta_x - \theta_x' = 517,4 - 490 = 27,4 \text{ }^\circ\text{C,}$$

в относительном выражении:

$$\delta_{\text{мет}} = \frac{\Delta_{\text{мет}}}{\theta_x} = \frac{27,4}{490} = 0,0559 = 5,59 \text{ \%}.$$

**Пример 3.2.2.** Определить значение термо-ЭДС термопары ХА (хромель-алюмелевой)  $E_{ТП}$  при измерении температуры  $\theta_x = 517 \text{ }^\circ\text{C}$ , если температура холодного спая  $\theta_{xc} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Решение:

1. Определяем значение термо-ЭДС  $E_x$ , соответствующее температуре  $\theta_x = 517 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$E_x = E_{Гс} = E_{ТН} + \frac{E_{ТВ} - E_{ТН}}{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}} \theta_x - \theta_{ТН} = 20,64 + \frac{24,90 - 20,64}{600 - 500} 517 - 500 = 21,364 \text{ мВ}$$

2. Определяем значение термо-ЭДС  $E_{xc}$ , соответствующее температуре свободных концов  $\theta_{xc} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$E_{xc} = E_{ТН} + \frac{E_{ТВ} - E_{ТН}}{\theta_{ТВ} - \theta_{ТН}} \theta_{xc} - \theta_{ТН} = 0,80 + \frac{4,10 - 0,80}{100 - 20} 40 - 20 = 1,165 \text{ мВ}$$

3. Результирующая термо-ЭДС термопары:

$$E_{ТП} = E_x' = E_x - E_{xc} = 21,364 - 1,165 = 20,199 \text{ мВ.}$$

Варианты заданий к п.3 приведены в Приложении 3.

## 4. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 4.1. Расчет плотности и величины заряда на гранях пьезоэлементов

Рассмотрение физической природы пьезоэффекта показывает, что при напряженном состоянии материала заряды принципиально могут возникать между тремя парами граней. Таким образом, поляризационный заряд является вектором и описывается тремя компонентами. Напряженное состояние характеризуется тензором второго ранга с девятью компонентами.

Пьезоэлектрический модуль, определяющий зависимости заряда от напряженного состояния, является тензором третьего ранга и определяется 27 компонентами.

Однако, при статическом равновесии, тензор механических напряжений содержит только 6 независимых компонентов, которые обозначаются:  $\sigma_{11} = \sigma_1$ ;  $\sigma_{22} = \sigma_2$ ;  $\sigma_{33} = \sigma_3$ ;  $\sigma_{23} = \sigma_4$ ;  $\sigma_{13} = \sigma_5$ ;  $\sigma_{12} = \sigma_6$ . Это позволяет перейти к упрощенной форме записи пьезомодуля, представив его в виде матрицы, содержащей 18 компонент вместо 27:

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix}$$

По таблице пьезомодулей можно рассчитать плотность заряда на всех трех гранях, при действии любого механического напряжения. При сжатии по оси X (рис.4.1.a) на грани перпендикулярной к этой оси возникает заряд, плотность которого  $\delta_1 = d_{11}\sigma_1$ .

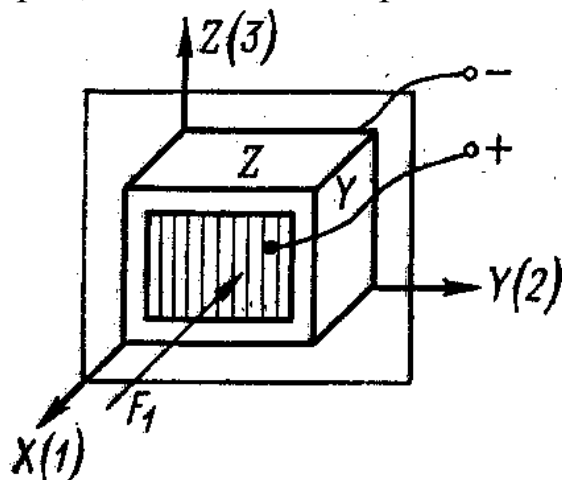


Рис.4.1.a. Схема образования зарядов при сжатии по оси X

При сжатии по оси  $Y$  (рис.4.1.б) плотность заряда  $\delta_1 = d_{12}\sigma_2$ .

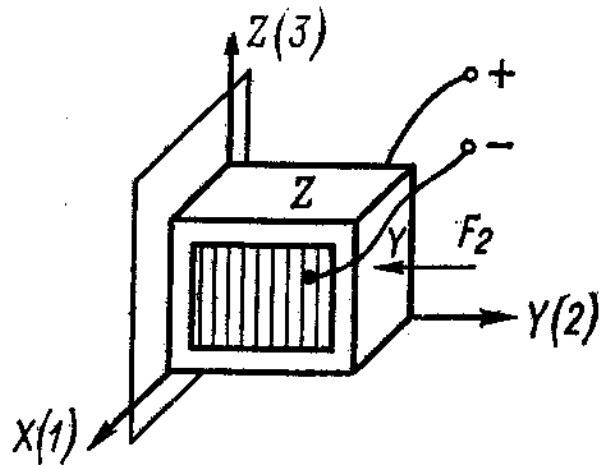


Рис.4.1.б. Схема образования зарядов при сжатии по оси  $Y$

При всестороннем сжатии (рис.4.1.в) заряд  $\delta_1 = d_{11}\sigma_1 + d_{12}\sigma_2 + d_{13}\sigma_3$ .

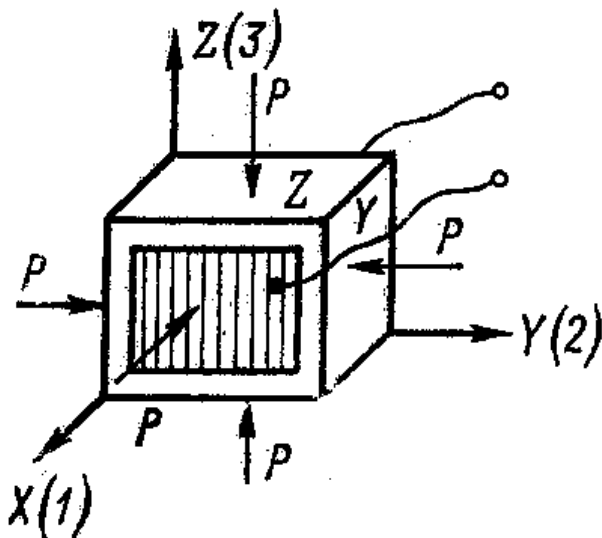


Рис.4.1.в. Схема образования зарядов при всестороннем сжатии

При сдвиге (рис.4.1.г)  $\delta_1 = d_{14}\sigma_4$ .

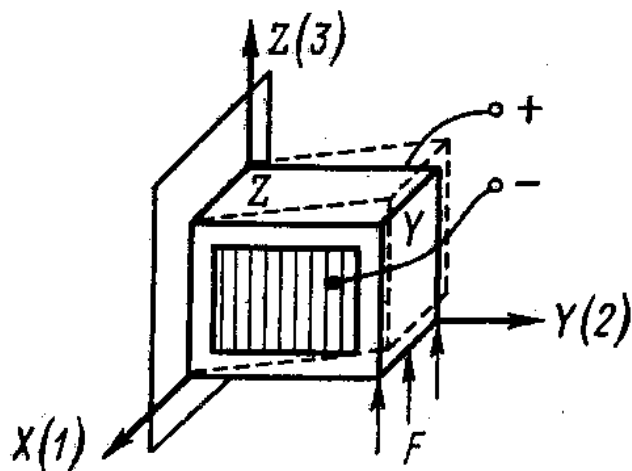


Рис.4.1.в. Схема образования зарядов при всестороннем сжатии

При продольном пьезоэффекте заряд не зависит от размеров пьезоэлементов. Так при сжатии по оси X заряд

$$q_1 = \delta_1 S_1 = S_1 d_{11} F_1 / S_1 = d_{11} F_1 .$$

При поперечном пьезоэффекте заряд может быть увеличен соответствующим выбором относительных размеров пьезоэлемента, то есть длин ребер x и y:

$$q_1 = \delta_1 S_1 = S_1 d_{11} F_2 / S_2 = d_{12} F_2 (zy) / (zx) = d_{12} F_2 y / x .$$

В общем виде плотность заряда определяется формулой

$$\delta_i = d_{ij} \sigma_j$$

( i=1,2,3 ; j=1,2,3,4,5,6 ).

Индекс пьезомодуля  $d_{ij}$  означает, что рассматривается заряд на грани i при действии напряжения вдоль оси j . При определении знаков заряда за положительное направление поля принимается направление поля вне пьезоэлемента, совпадающее с положительным направлением соответствующей оси.

Обратный пьезоэффект так же определяется по матрице пьезомодулей. При приложении электрического поля напряженностью  $E_1$  между гранями 1-1, или X-X, происходит деформация элемента в направлении оси X, равная

$$\varepsilon_1 = d_{11} E_1 .$$

Симметрия структуры веществ приводит к сокращению числа независимых компонент в матрицах пьезомодулей, большая часть компонент оказывается равной 0. Значения пьезомодулей  $d_{ij}$  для кварца и титаната бария приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1– Значения пьезомодулей

Материал	Значения пьезомодулей $d_{ij}$ , $10^{-12}$ Кл/Н					
Кварц	-2,31	2,31	0	-0,67	0	0
	0	0	0	0	0,67	4,62
	0	0	0	0	0	0
Титанат бария	0	0	0	0	250	0
	0	0	0	250	0	0
	-78	-78	190	0	0	0

## 4.2. Расчет пьезоэлектрического преобразователя

Эквивалентная схема преобразователя, соединенного кабелем с измерительной цепью представлена на рис.4.2, на котором

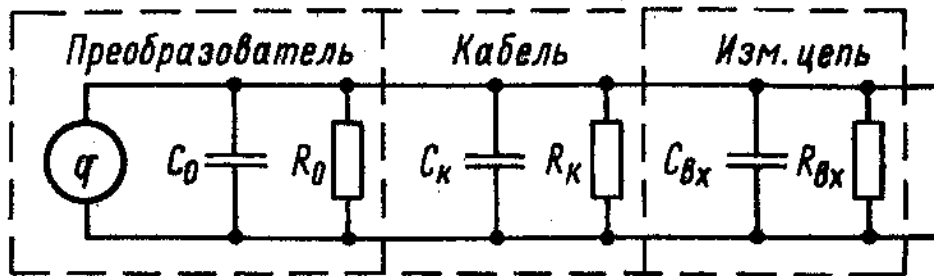


Рис.4.2. Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя

$C_0$  – емкость между гранями пьезоэлектрика (емкость преобразователя);  $C_к$  – емкость кабеля между жилой и экраном;  $C_{вх}$  – входная емкость измерительной цепи;  $R_0$  – сопротивление преобразователя;  $R_к$  – сопротивление изоляции кабеля;  $R_{вх}$  – входное сопротивление измерительной цепи.

Эквивалентную схему можно упростить (рис.4.3), где  $R=R_0 \parallel R_к \parallel R_{вх}$ ,  $C=C_0+C_к+C_{вх}$ .

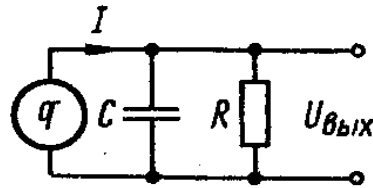


Рис.4.3. Упрощенная эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя

При синусоидальной силе:  $f=F_m \sin \omega t$  мгновенный ток равен

$$i = dq/dt = d(d_{11}F_m \sin \omega t)/dt .$$

Выходное напряжение преобразователя с подключенной к нему измерительной цепью

$$\dot{U}_{вых} = I \left[ \frac{R/(j\omega \cdot C)}{R + 1/(j\omega \cdot C)} \right], \text{ где } I = j\omega \cdot d_{11} \dot{F} ;$$

$$\dot{U}_{вых} = d_{11} \dot{F} \left[ \frac{j\omega \cdot R}{1 + j\omega \cdot RC} \right].$$

Как видно из последнего выражения амплитуда напряжения и сдвиг фаз между напряжением и измеряемой силой зависят от частоты

$$U_{\text{вых}_m} = \frac{d_{11} F_m}{C} \frac{\omega \cdot RC}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}; \varphi = \pi/2 + \text{arctg}(\omega \cdot RC).$$

Из приведенного выражения следует, что напряжение на входе усилителя не будет зависеть от частоты только при высоких частотах  $\omega > 1/(RC)$  и будет равно  $U_{\text{вых}} = d_{11} \dot{F} / C$ .

Отсюда видно, что выходное напряжение преобразователя зависит от емкости входной цепи. Поэтому если в характеристиках преобразователя указывается его чувствительность по напряжению, то обязательно должна быть указана и емкость, соответствующая этой чувствительности.

### 4.3. Расчет термочувствительного пьезорезонансного преобразователя

Преобразователи, в которых используются одновременно прямой и обратный пьезоэффекты, — пьезорезонаторы, имеют максимальный коэффициент преобразования одного вида энергии в другой на резонансной частоте и резко уменьшающийся коэффициент преобразования при отступлении от резонансной частоты.

Рабочие частоты термочувствительных резонаторов лежат в диапазоне 1—30 МГц, используются колебания как на основной частоте (1—10 МГц), так и на третьей и пятой гармониках (5—30 МГц).

В качестве термочувствительных резонаторов применяются резонаторы Y-среза, AC-среза и LC-среза. Коэффициенты термочувствительности для этих срезов, соответствующие уравнению преобразования

$$f = f_0 [1 + K_1(\theta - \theta_0) + K_2(\theta - \theta_0)^2 + K_3(\theta - \theta_0)^3],$$

приведены в таблице 4.1 ( $\theta$  - преобразуемая температура,  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ).

Таблица 4.1– Коэффициенты термочувствительности

Тип среза	$K_1, 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$K_2, 10^{-9} \text{K}^{-2}$	$K_3, 10^{-12} \text{K}^{-3}$
Y-срез	+92,5	+57,5	+5,8
AC-срез	+20	+23	+116
LC-срез	+33,78±0,12	±0,14	±0,23

В зависимости от собственной частоты резонатора  $f_0$  и типа среза термочувствительность датчиков составляет  $S_{\Theta} = \Delta f / \Delta \Theta = 20 \div 2850$  Гц/К.

#### 4.4. Примеры расчета и варианты заданий

**Пример 4.4.1.** Определить плотность и величину заряда, образующегося на гранях пьезоэлемента из кварца с габаритными размерами:  $x=5$  мм,  $y=10$  мм,  $z=5$  мм при а) сжатии вдоль оси X с  $F_1=2$ Н; б) сжатии вдоль оси Y с  $F_2=2$ Н; в) всестороннем сжатии с  $P=2$ Н; г) сдвиге с  $F=2$ Н.

Случай а). При продольном пьезоэффекте заряд не зависит от размеров пьезоэлементов. Величину заряда определим по формуле:

$$q_1 = d_{11} F_1 = -2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 2 = -4,62 \cdot 10^{-12} \text{ Кл.}$$

Плотность заряда:

$$\delta_1 = q_1 / S_1 = q_1 / (y \cdot z) = -4,62 \cdot 10^{-12} / (10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = -92,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^2.$$

Случай б). При поперечном пьезоэффекте величину заряда определим по формуле:

$$q_1 = d_{12} F_2 y / x = 2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-3} = 9,24 \cdot 10^{-12} \text{ Кл.}$$

Плотность заряда:

$$\delta_1 = q_1 / S_1 = q_1 / (y \cdot z) = 9,24 \cdot 10^{-12} / (10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = 184,8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^2.$$

Случай в). Плотность заряда определим по формуле:

$$\delta_1 = d_{11} \sigma_1 + d_{12} \sigma_2 + d_{13} \sigma_3 = d_{11} \cdot P / (y \cdot z) + d_{12} \cdot P / (x \cdot z) + d_{13} \cdot P / (x \cdot y) =$$

$$-2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 2 / (10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}) + 2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 2 / (5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}) + 0 = 92,4 \cdot 10^{-9}$$

Кл/м<sup>2</sup>.

Величина заряда:

$$q_1 = \delta_1 \cdot S_1 = \delta_1 \cdot y \cdot z = 92,4 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 4,62 \cdot 10^{-12} \text{ Кл.}$$

Случай г). Плотность заряда определим по формуле:

$$\delta_1 = d_{14} \sigma_4 = d_{14} \cdot F / (x \cdot z) = -0,67 \cdot 10^{-12} \cdot 2 / (5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = -53,6 \cdot 10^{-9}$$

Кл/м<sup>2</sup>.

Величина заряда:

$$q_1 = \delta_1 \cdot S_1 = \delta_1 \cdot y \cdot z = -53,6 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = -2,68 \cdot 10^{-12} \text{ Кл.}$$

**Пример 4.4.2.** Найти амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{вых } m}$  пьезоэлектрического преобразователя силы  $f = F_m \sin \omega t$  и сдвиг фаз

между напряжением и измеряемой силой, если сопротивление преобразователя  $R_0=10^9$  Ом, емкость преобразователя  $C_0=50$  пФ, сопротивление кабеля  $R_k=10^{10}$  Ом, емкость кабеля  $C_k=20$  пФ, сопротивление измерительной цепи  $R_{ex}=10^{10}$  Ом, емкость измерительной цепи  $C_{ex}=30$  пФ, амплитуда действующей силы  $F_m=10$  Н, ее круговая частота  $\omega=2\pi \cdot 50$  Гц. Пьезоэлемент выполнен из кварца и испытывает продольные деформации.

Определяем эквивалентную емкость:

$$C=C_0+C_k+C_{ex}=50+20+30=100 \text{ пФ.}$$

Определяем эквивалентное сопротивление:

$$R=1/(1/R_0 + 1/R_k + 1/R_{ex})=1/(1/10^9 + 1/10^{10} + 1/10^{10})=0,833 \cdot 10^9 \text{ Ом.}$$

Определяем амплитуду выходного напряжения:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}_m} &= \frac{d_{11} F_m}{C} \frac{\omega \cdot RC}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} = \frac{d_{11} F_m \cdot \omega \cdot R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} = \\ &= \frac{-2,31 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,833 \cdot 10^9}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot 50 \cdot 0,833 \cdot 10^9 \cdot 100 \cdot 10^{-12})^2}} = -0,2308 \text{ В.} \end{aligned}$$

Определяем сдвиг фаз:

$$\varphi = \pi/2 + \arctg(\omega \cdot RC) = \pi/2 + \arctg(2\pi \cdot 50 \cdot 0,833 \cdot 10^9 \cdot 100 \cdot 10^{-12}) = 0,998\pi.$$

**Пример 4.4.3.** Найти выходную частоту и чувствительность для термочувствительного пьезорезонансного преобразователя, использующего кварц Y-среза, если собственная частота резонатора  $f_0=10$  МГц, для температур  $\Theta_1=20^\circ\text{C}$  и  $\Theta_2=50^\circ\text{C}$ .

Выходная частота для температуры  $\Theta_1=20^\circ\text{C}$  равна  $f_1=f_0=10$  МГц.

Определяем выходную частоту для температуры  $\Theta_2=50^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} f_2 &= f_0 [1 + K_1(\theta - \theta_0) + K_2(\theta - \theta_0)^2 + K_3(\theta - \theta_0)^3] = \\ &= 10 \cdot 10^6 [1 + 92,5 \cdot 10^{-6} (50 - 20) + 57,5 \cdot 10^{-9} \cdot (50 - 20)^2 + 5,8 \cdot 10^{-12} \cdot (50 - 20)^3] = \\ &= 10028269 \text{ Гц.} \end{aligned}$$

Определяем чувствительность:

$$S_\Theta \approx \Delta f / \Delta \Theta = (f_2 - f_1) / (\Theta_2 - \Theta_1) = (10028269 - 10000000) / (50 - 20) = 942,3 \text{ Гц/К.}$$

Варианты заданий к п.4 приведены в Приложении 4.

## 5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 5.1. Расчет емкостного преобразователя перемещения

Емкостной преобразователь перемещения изображен на рис.5.1.

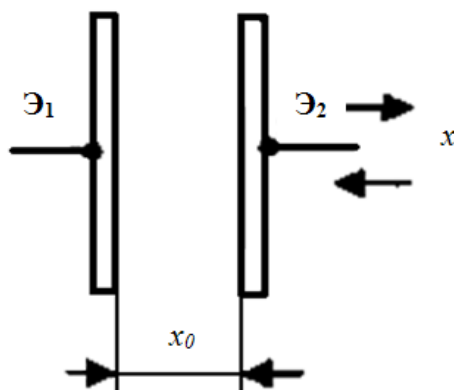


Рис.5.1. Схема емкостного преобразователя перемещения

При расчетах емкостных преобразователей с изменением воздушного зазора  $x$  между электродами электрода  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  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,  $\varepsilon_0 = 10^{-9} \cdot 36\pi = 8,842 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха  $\varepsilon_{\text{в}} = 1$ );  $F$  - площадь перекрытия пластин (электродов).

2. Чувствительность преобразователя:

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

3. Электрическое сопротивление преобразователя:

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

где  $f$  - частота питающего напряжения.

### 5.2. Расчет емкостного преобразователя толщины

Емкостной преобразователь толщины диэлектрической ленты изображен на рис.5.2.

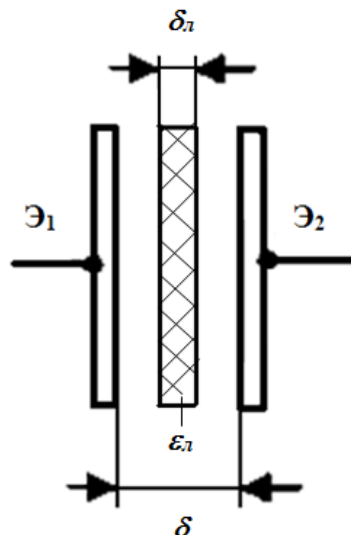


Рис.5.2. Схема емкостного преобразователя толщины диэлектрической ленты

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

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

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

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

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. Расчет емкостного преобразователя влажности

При расчетах емкостных преобразователей с изменением диэлектрической проницаемости движущейся ленты из диэлектрика (например, из-за влажности диэлектрика) можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$C_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_0 \cdot F}{\delta - \delta_l + \delta_l/\varepsilon_l}; \quad (5.7)$$

$$S_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_0 \cdot F \cdot \delta_l}{(\delta - \delta_l \varepsilon_l + \delta_l)^2}; \quad (5.8)$$

$$X_c = 1/(2\pi f C_{\varepsilon}); \quad (5.9)$$

где  $C_{\varepsilon}$ ,  $S_{\varepsilon}$ ,  $X_c$  - соответственно, емкость, чувствительность и

электрическое сопротивление преобразователя;  $\delta$  и  $\delta_{\text{л}}$  - соответственно, расстояние между пластинами преобразователя и толщина ленты из диэлектрика;  $\varepsilon_{\text{л}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала ленты;  $F$  - площадь перекрытия пластин преобразователя;  $f$  - частота питающего напряжения.

#### 5.4. Примеры расчетов и варианты заданий

**Пример 5.4.1.** Рассчитать емкостной преобразователь перемещения со следующими параметрами: диаметр пластин  $D=2$  см, начальный зазор  $\delta_0=0,5$  мм, максимальное перемещение подвижной пластины  $x_m=10$  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  $x=x_m$ ):

$$C_x = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \pi D^2 / 4}{x} = \frac{8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 / 4}{10 \cdot 10^{-3}} = 0,278 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \\ = 0,278 \text{ пФ.}$$

По формуле (5.2) определяем чувствительность преобразователя

$$S_x = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \pi D^2 / 4}{x^2} = \frac{8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 / 4}{(10 \cdot 10^{-3})^2} = 27,8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \\ = 27,8 \frac{\text{пФ}}{\text{м}} = 0,0278 \frac{\text{пФ}}{\text{мм}}.$$

Электрическое сопротивление преобразователя определяем по формуле (5.3):

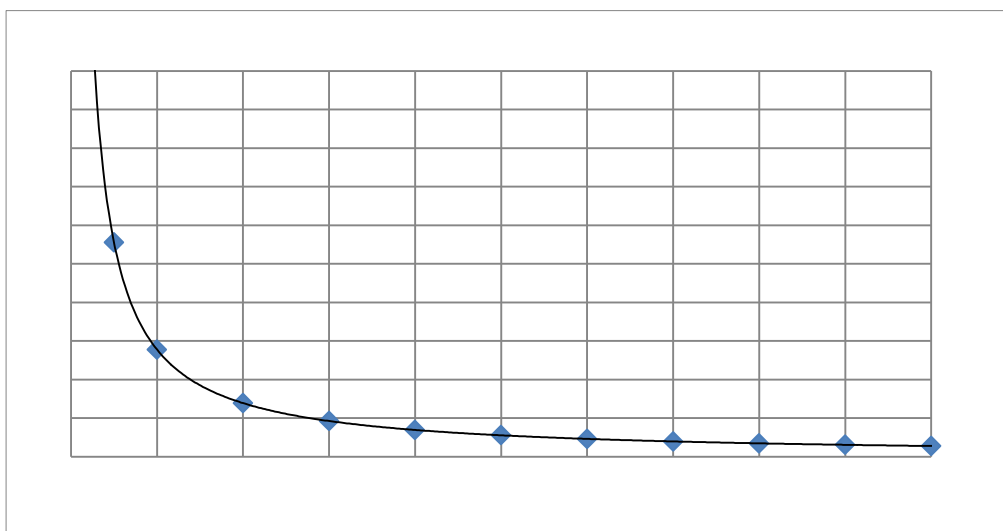
$$X_c = \frac{x}{2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \pi D^2 / 4} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot 8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 / 4} \\ = 11,46 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 11,46 \text{ кОм.}$$

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

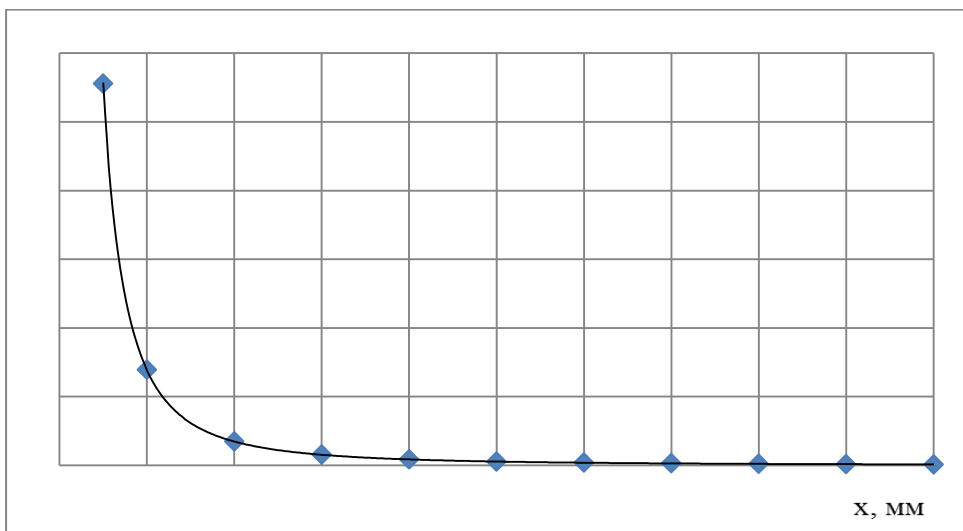
Таблица 5.1 – Результаты расчетов

$x$ , 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	0,57	1,15	2,29	3,44	4,58	5,73	6,87	8,02	9,17	10,31	11,46

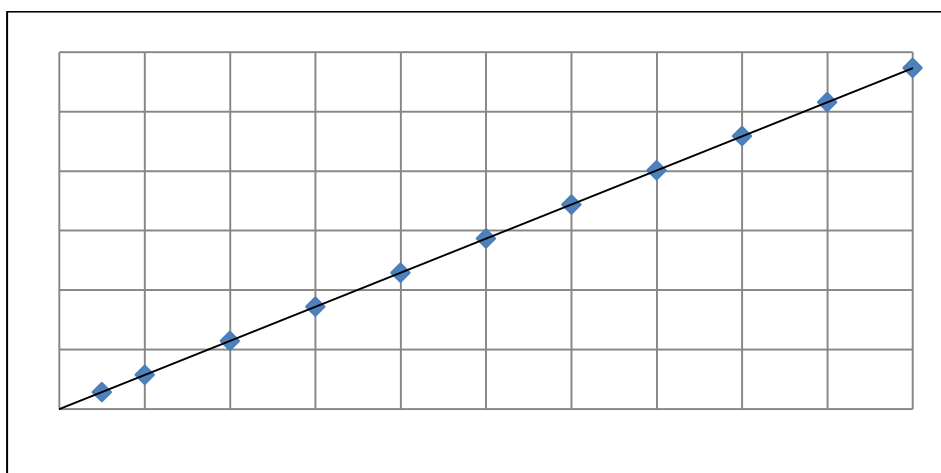
По данным таблицы 5.1. построены графики зависимостей  $C_x$ ,  $S_x$ ,  $X_c$  от  $x$ , представленные на рис.5.2.а, б, в.



*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 5.4.2.** Рассчитать емкостный преобразователь для измерения толщины ленты из диэлектрического материала с  $\varepsilon_{л} = 2,5$ . Преобразователь состоит из двух неподвижных пластин с площадью перекрытия  $F=200 \text{ см}^2$ , между которыми перемещается лента толщиной  $\delta_{л} = 1 \text{ мм}$ . 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  $\delta_{л}$ , 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  $\delta_{л} = 1 \text{ мм}$ ):

$$C_{\delta} = \frac{8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 200 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 1/2,5)} = 73,68 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 73,68 \text{ пФ};$$

$$S_{\delta} = \frac{8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 200 \cdot 10^{-4} \cdot (2,5 - 1)}{2,5 \cdot (3 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 1/2,5))^2} = 1,842 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ф}}{\text{м}} = 18,42 \frac{\text{пФ}}{\text{мм}};$$

$$X_c = 1/(2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot 73,68 \cdot 10^{-12}) = 4320 \text{ Ом} = 4,320 \text{ кОм}.$$

Аналогично произведем расчет для других значений  $\delta_{л}$ , результаты расчетов сведем в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчетов

$\delta_{л}$ , мм	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$C_{\delta}$ , пФ	58,9	60,1	61,4	62,7	64,1	65,5	67,0	68,5	70,2	71,9	73,7
$S_{\delta}$ , пФ/мм	11,8	12,3	12,8	13,3	13,9	14,6	15,2	15,9	16,6	17,7	18,4
$X_c$ , кОм	5,40	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  $\delta_{л}$ , приведенные на рис.5.4.а, б, в.

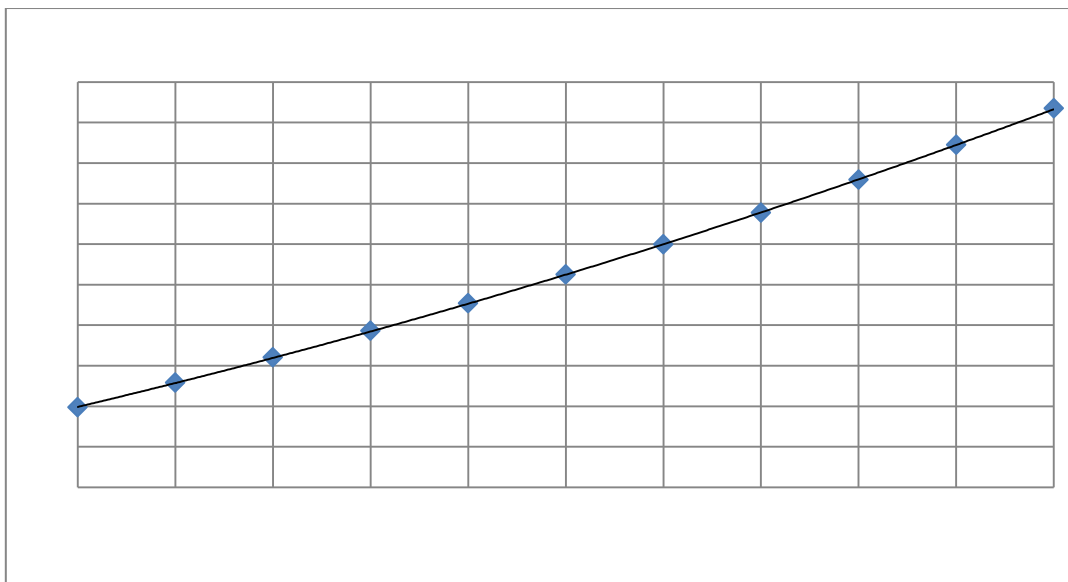


Рис.5.4.а. График зависимости  $C_{\delta}=f(\delta_{л})$

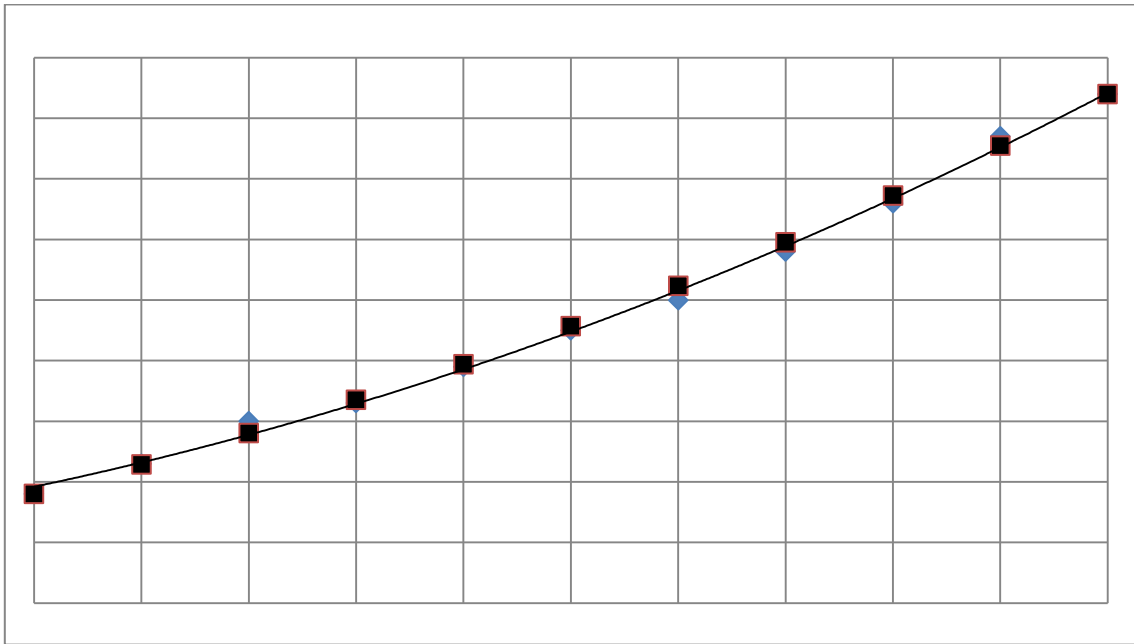


Рис.5.4.б. График зависимости  $S_{\delta}=f(\delta_{л})$

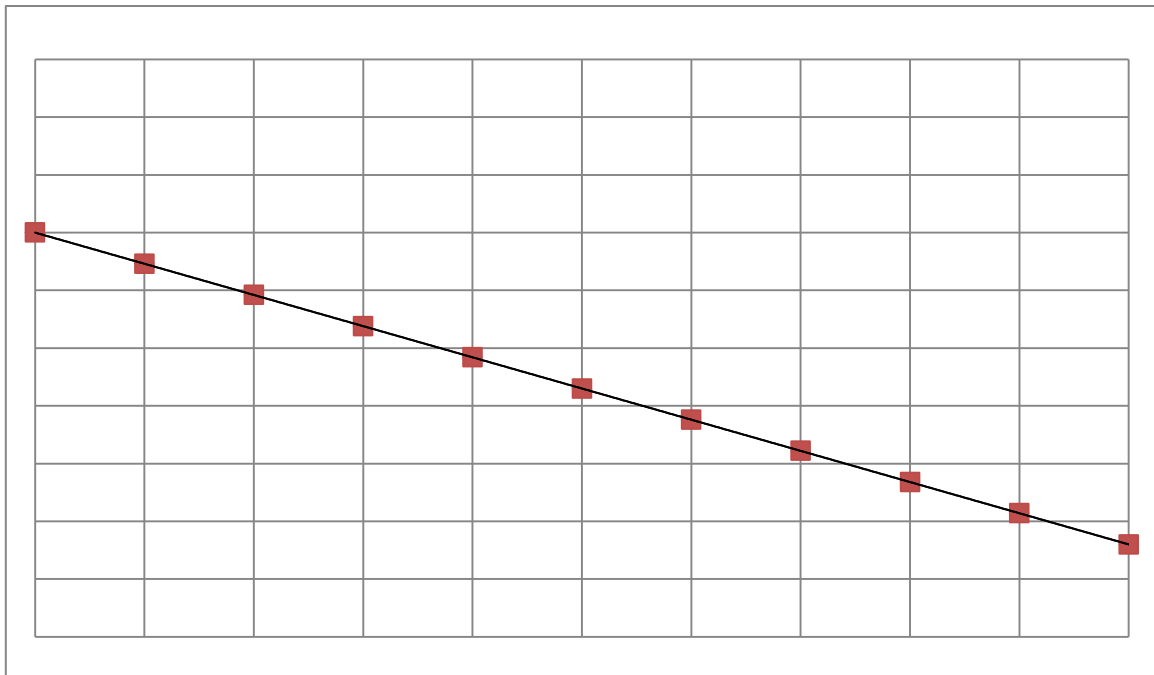


Рис.5.4.в. График зависимости  $X_c=f(\delta_{л})$

**Пример 5.4.3.** Рассчитать емкостной преобразователь влажности диэлектрической ленты, перемещающейся между обкладками плоского конденсатора. Площадь перекрываемых пластин  $F=200 \text{ см}^2$ ; расстояние между пластинами  $\delta = 3 \text{ мм}$ ; толщина ленты  $\delta_{л} = 1 \text{ мм}$ ; диэлектрическая проницаемость материала  $\epsilon_{л} = 2 \div 10$ ; частота питающего напряжения  $f = 0,5 \text{ МГц}$ .

Рассчитать и построить графики зависимости  $C_\varepsilon, S_\varepsilon, X_c$  от  $\varepsilon_L$ , изменяющейся в диапазоне от 2 до 10 усл.ед. с шагом 2.

Проведем расчет преобразователя, используя формулы (5.7), (5.8), (5.9). Для  $\varepsilon_L = 10$ :

$$C_\varepsilon = \frac{8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 200 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3}/10} = 84,21 \cdot 10^{-12} \Phi = 84,21 \text{ пФ};$$

$$S_\varepsilon = \frac{8,842 \cdot 10^{-12} \cdot 200 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{(3 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3} / 10 + 1 \cdot 10^{-3})^2} = 0,401 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{отн. ед.}}$$

$$= 0,401 \frac{\text{пФ}}{\text{отн. ед.}};$$

$$X_c = 1/(2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot 84,21 \cdot 10^{-12}) = 3788 \text{ Ом} = 3,788 \text{ кОм}.$$

Аналогично произведем расчет для других значений  $\varepsilon_L$ , результаты расчетов сведем в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчетов

$\varepsilon_L$	2	4	6	8	10
$C_\varepsilon, \text{ пФ}$	70,74	78,60	81,62	83,22	84,21
$CS_\varepsilon, \text{ пФ}/(\text{отн. ед.})$	7,07	2,18	1,05	0,61	0,4
$X_c, \text{ кОм}$	4,502	4,052	3,902	3,827	3,782

По данным таблицы 5.3 построены графики зависимости  $C_\varepsilon, S_\varepsilon, X_c$  от  $\varepsilon_L$ , отн. ед., представленные на рис.5.5.а, б, в.  $C_\varepsilon$

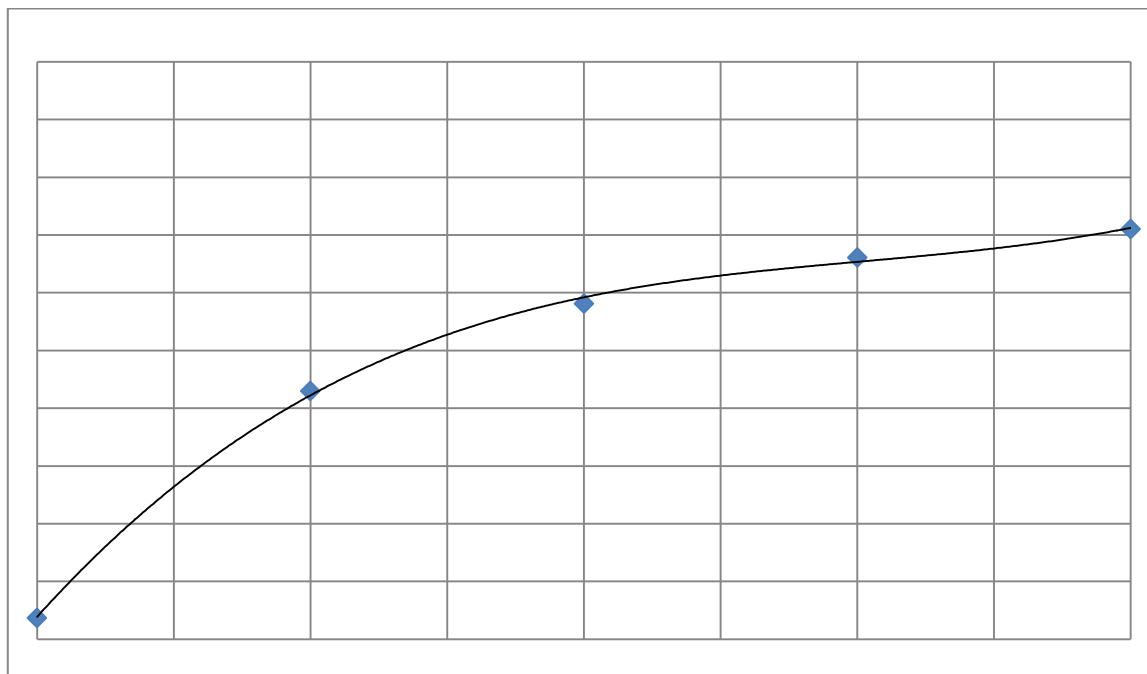
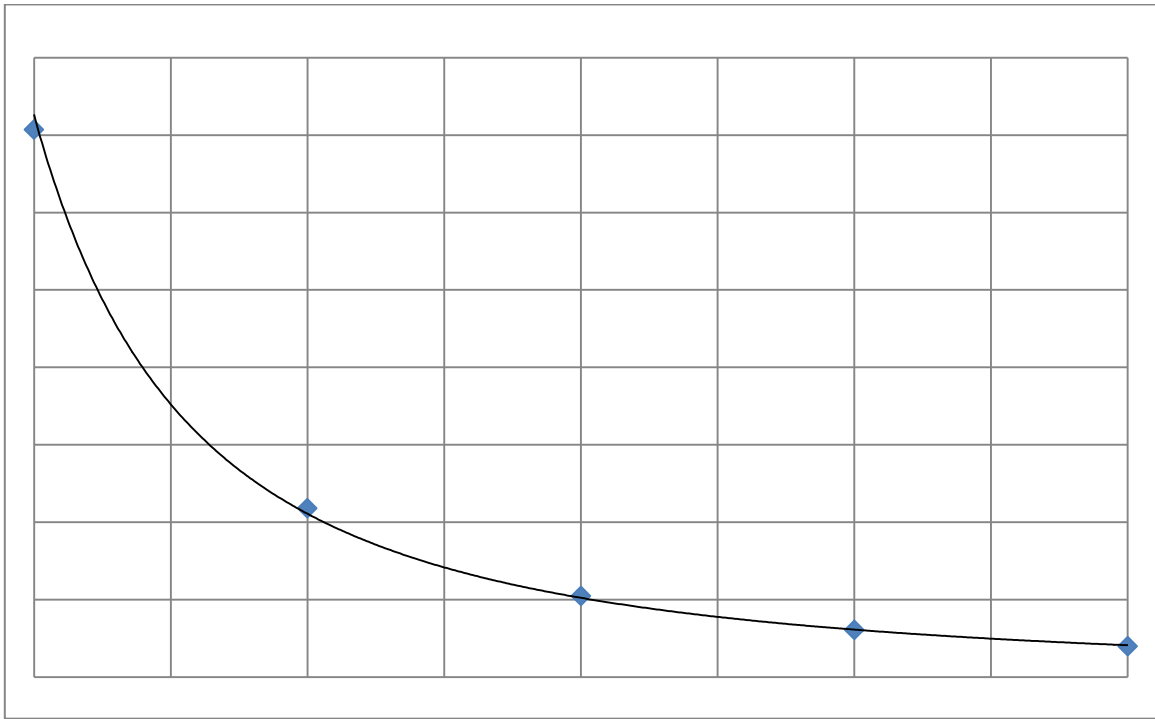
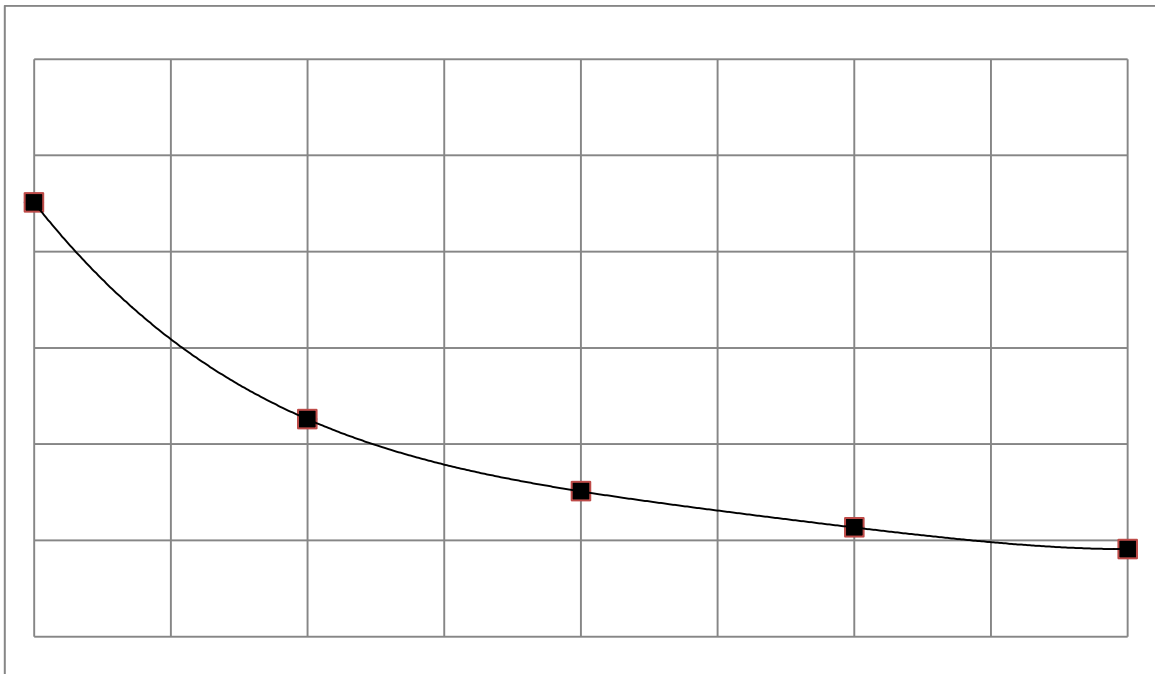


Рис.5.5.а. График зависимости  $C_\varepsilon=f(\varepsilon_L)$



*Рис.5.4.б. График зависимости  $S_\varepsilon=f(\varepsilon_L)$*



*Рис.5.4.в. График зависимости  $X_\varepsilon=f(\varepsilon_L)$*

Варианты заданий к п.5 приведены в Приложении 5.

## 6. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 6.1. Расчет преобразователя Холла

Преобразователь Холла представляет собой четырехполюсник, обычно выполняемый в виде тонкой пластинки или пленки из полупроводникового материала. Токовые электроды 1 и 2 (рис. 6.1) выполняются по всей ширине поперечных граней, что обеспечивает равномерное распределение входного тока по сечению преобразователя. Потенциальные (Холловы) электроды 3 и 4 расположены в центральной части продольных граней.

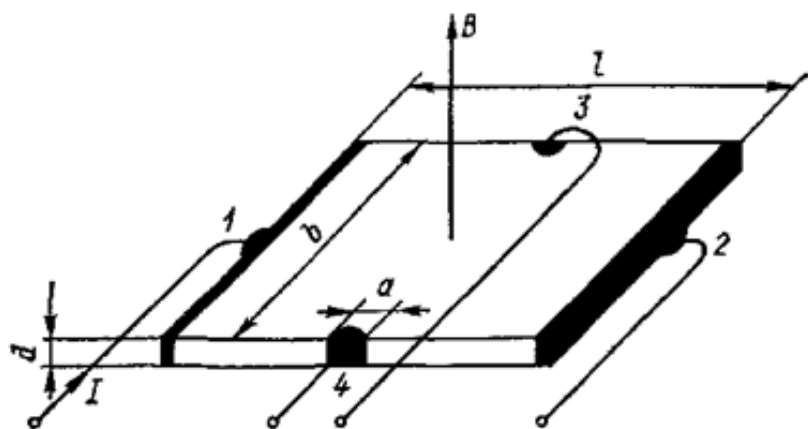


Рис.6.1. Схема преобразователя Холла

В магнитном поле носители заряда под действием сил Лоренца  $F = evB$  изменяют свою траекторию, вследствие чего на одной из боковых граней концентрация зарядов одного знака увеличивается, в то время как на противоположной грани - уменьшается. Возникающая при этом разность потенциалов (ЭДС Холла) определяется выражением

$$E_{\text{ХЛ}} = R_{\text{ХЛ}} \cdot \varphi K_{\text{геом}, \theta} \cdot I \cdot B \cdot \cos \alpha / d,$$

где  $R_{\text{ХЛ}}$  - постоянная Холла, зависящая от свойств материала преобразователя;  $\varphi K_{\text{геом}, \theta}$  - функция, зависящая от геометрии преобразователя и так называемого угла Холла  $\theta$  между векторами плотности тока и напряженности вызывающего его электрического поля, определяемого подвижностью носителей зарядов и значением магнитной индукции (при  $l/b = 2$  и  $a/l \leq 0,1$  функция  $\varphi \approx 1$ );  $\alpha$  - угол между вектором магнитной индукции и магнитной осью

преобразователя, совпадающей в первом приближении с нормалью к плоскости преобразователя.

Выходная величина преобразователя Холла пропорциональна произведению двух входных величин - тока и магнитной индукции. Таким образом, преобразователь Холла является множительным преобразователем. При постоянных во времени  $I$  и  $B$  ЭДС Холла является постоянной величиной. Если одна из входных величин ( $B$  или  $I$ ) постоянная, а другая - переменная, то ЭДС Холла будет переменной величиной той же частоты, что и частота входной величины. В случае если обе входные величины имеют одну и ту же частоту и сдвинуты по фазе на угол  $\varphi$ , ЭДС Холла будет состоять из постоянной и переменной двойной частоты составляющих:

$$E_{\text{ХЛ}} = \frac{R_{\text{ХЛ}}}{d} \cdot B \cdot I \cdot \cos\varphi + \frac{R_{\text{ХЛ}}}{d} \cdot B \cdot I \cdot \cos 2\omega t + \varphi .$$

Если ток изменяется с частотой  $\omega_1$ , а магнитная индукция - с частотой  $\omega_2$ , то ЭДС Холла содержит две составляющие, одна из которых имеет частоту  $\omega_1 - \omega_2$ , а другая  $\omega_1 + \omega_2$ .

Входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  преобразователя Холла определяется как сопротивление между токовыми электродами, а выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  равно сопротивлению между холловыми электродами. В серийно выпускаемых преобразователях Холла  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  близки по значению и могут достигать значения от 0,5 Ом до нескольких кОм. Вследствие магниторезистивного эффекта  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  увеличиваются с ростом магнитной индукции.

Гальваномагнитная чувствительность преобразователя Холла при  $\alpha=0$  определяется выражением:

$$S_{BI} = E_{\text{ХЛ}} / (B \cdot I) = R_{\text{ХЛ}} \cdot \varphi K_{\text{геом}}, \theta / d.$$

Чувствительность к магнитной индукции определяется при номинальном значении входного тока выражением:

$$S_B = E_{\text{ХЛ}} / B = R_{\text{ХЛ}} \cdot I_{\text{ном}} \varphi K_{\text{геом}}, \theta / d,$$

где  $I_{\text{ном}} = \text{const}$  и для серийно выпускаемых преобразователей значение чувствительности  $0,03 \div 1$  В/Тл. Значение тока  $I_{\text{ном}}$  ограничено допустимой температурой перегрева преобразователя. Для высокоомных преобразователей допустимые значения токов составляют  $5 \div 50$  мА, для низкоомных  $100 \div 200$  мА.

Чувствительность к току  $S_I$  определяется при постоянном значении магнитной индукции ( $B = \text{const}$ ):

$$S_I = E_{\text{хл}}/I = R_{\text{хл}} \cdot B \cdot \varphi K_{\text{геом},\theta} / d,$$

где  $B=\text{const}$ . При  $B=1$  Тл чувствительность к току для различных преобразователей составляет  $0,3 \div 50$  В/А.

## 6.2. Примеры расчета и варианты заданий

**Пример 6.2.1.** Дано: преобразователь Холла со следующими параметрами:  $l=1,6$  мм,  $b=0,8$  мм,  $d=0,15$  мм,  $a=0,15$  мм,  $R_{\text{хл}}=4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/(А·с), при  $I_{\text{ном}}=10$  мА,  $B=1$  Тл,  $\alpha=0$ . Найти:  $E_{\text{хл}}$ ,  $S_{BI}$ ,  $S_B$ ,  $S_I$ .

Решение:

1. Т. к.  $l/b=1,6/0,8=2$  и  $a/l=0,15/1,6=0,094 \leq 0,1$ , то функция  $\varphi \approx 1$ .
2.  $E_{\text{хл}} = R_{\text{хл}} \cdot \varphi K_{\text{геом},\theta} \cdot I \cdot B \cdot \cos \alpha / d = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1 / (0,15 \cdot 10^{-3}) = 0,267$  В.
3.  $S_{BI} = E_{\text{хл}} / (B \cdot I) = 0,267 / (1 \cdot 10 \cdot 10^{-3}) = 26,7$  В/(Тл·А).
4.  $S_B = E_{\text{хл}} / B = 0,267 / 1 = 0,267$  В/Тл.
5.  $S_I = E_{\text{хл}} / I = 0,267 / 10 \cdot 10^{-3} = 26,7$  В/А.

**Пример 6.2.2.** Дано: преобразователь Холла со следующими параметрами:  $l=1,6$  мм,  $b=0,8$  мм,  $d=0,15$  мм,  $a=0,15$  мм,  $S_B=0,267$  В/Тл,  $I_{\text{ном}}=10$  мА. Найти:  $R_{\text{хл}}$ ,  $S_{BI}$ ,  $S_I$  и  $E_{\text{хл}}$  при  $B=1$  Тл,  $\alpha=0$ .

Решение:

1. Т. к.  $l/b=1,6/0,8=2$  и  $a/l=0,15/1,6=0,094 \leq 0,1$ , то функция  $\varphi \approx 1$ .
2. Из выражения для чувствительности к магнитной индукции:  
 $R_{\text{хл}} = S_B \cdot d / (I_{\text{ном}} \varphi K_{\text{геом},\theta}) = 0,267 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} / (10 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 0,004$  м<sup>3</sup>/(А·с).
3.  $S_{BI} = R_{\text{хл}} \cdot \varphi K_{\text{геом},\theta} / d = 0,004 \cdot 1 / (0,15 \cdot 10^{-3}) = 26,6$  В/(Тл·А).
4.  $S_I = R_{\text{хл}} \cdot B \cdot \varphi K_{\text{геом},\theta} / d = 0,004 \cdot 1 / (0,15 \cdot 10^{-3}) = 26,7$  В/А.
5.  $E_{\text{хл}} = B \cdot S_B = 1 \cdot 0,267 = 0,267$  В.

Варианты заданий к п.6 приведены в Приложении 6.

## 7. ОСНОВЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Расчет цепей с постоянными магнитами затрудняется тем обстоятельством, что внутреннее сопротивление источника МДС, т.е. магнита, сравнимо по значению с сопротивлением внешней цепи и зависит от проходящего через магнит потока, то есть оно нелинейно.

На рис.7.1 изображена схема цепи с постоянным магнитом и воздушным зазором и схема ее замещения. На этом рисунке:

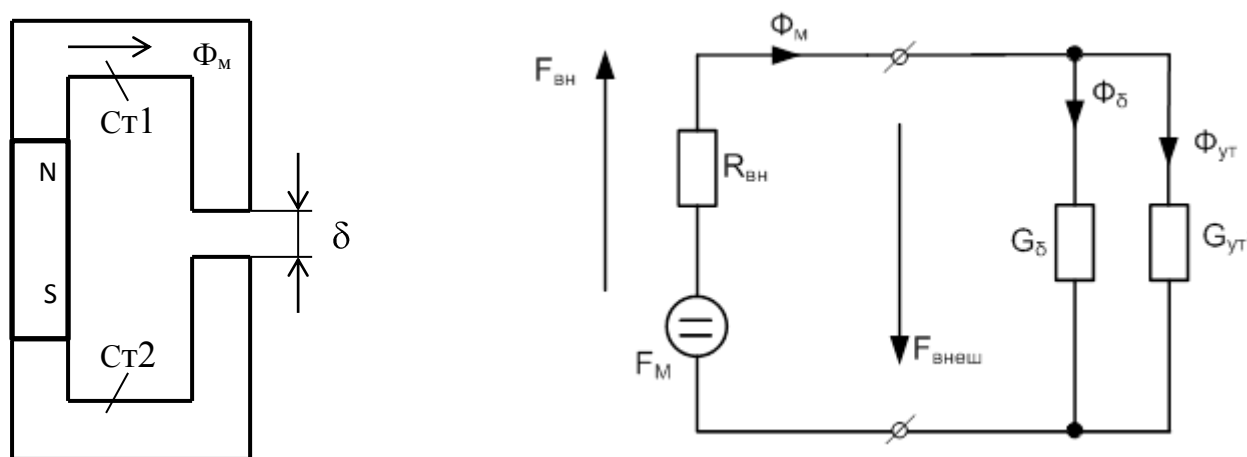


Рис.7.1. Схема цепи с постоянным магнитом и воздушным зазором и схема ее замещения

NS – постоянный магнит, Ст1 и Ст2 – стальные участки магнитопровода (магнитными сопротивлениями которых обычно пренебрегают:  $R_{cm1}=0$ ,  $R_{cm2}=0$ ),  $\delta$  - длина воздушного зазора,  $\Phi_M$  – магнитный поток через магнит и магнитопровод,  $F_M$  – МДС магнита,  $R_{вн}$  – внутреннее сопротивление источника МДС (магнита),  $G_\delta$  – проводимость воздушного зазора под его полюсами ( $R_\delta=1/G_\delta$  – магнитное сопротивление воздушного зазора),  $G_{ут}$  – проводимость путей утечек ( $R_{ут}=1/G_{ут}$  – магнитное сопротивление путей утечек),  $\Phi_\delta$  – магнитный поток зазора,  $\Phi_{ут}$  – магнитный поток путей утечек,  $F_{вн}$  – падение МДС на внутреннем сопротивлении магнита,  $F_{внеш}$  – падение МДС на сопротивлении внешней цепи. Магнитные проводимость и сопротивление внешней цепи:  $G_{внеш}=G_\delta+G_{ут}$ ,  $R_{внеш}=1/G_{внеш}$ .

Зависимость потока через магнит и магнитную цепь от МДС, падающей на внутреннем сопротивлении магнита ( $F_{вн}=R_{вн} \cdot \Phi_M$ ) и во внешней магнитной цепи ( $F_{внеш}=R_{внеш} \cdot \Phi_M$ ) показана на рис.7.2. При

коротком замыкании магнита ( $R_{внеш}=0$ ) вся МДС  $F_M=H_c \cdot l_M$  (где  $H_c$  – коэрцитивная сила,  $l_M$  – длина магнита) падает на внутреннем сопротивлении магнита и поток магнита максимален и равен  $\Phi_r=B_r \cdot S_M$ , т.е. остаточной индукции материала магнита  $B_r$ , умноженной на площадь поперечного сечения магнита  $S_M$ . Если внешняя цепь имеет конечное сопротивление, то координаты точки  $b$  на кривой определяются соотношением  $\Phi_M/F_{внеш} = 1/R_{внеш} = G_{внеш}$ .

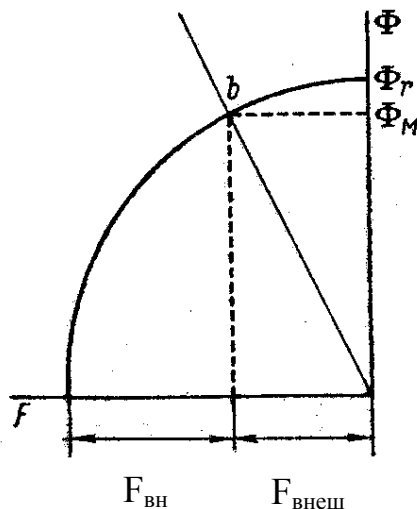


Рис.7.2. Зависимость потока через магнит и магнитную цепь от МДС

Для того чтобы абстрагироваться от размеров конкретного магнита, при расчетах используются кривые магнитных материалов  $B=f(H)$ . Для этих кривых положение точки  $a'$  (рис.7.3) определяется отношением  $B_M/H_M = G_{внеш} \cdot l_M / S_M$ , поток магнита и его МДС рассчитываются как  $\Phi_M=B_M \cdot S_M$  и  $F_M=H_M \cdot l_M$ .

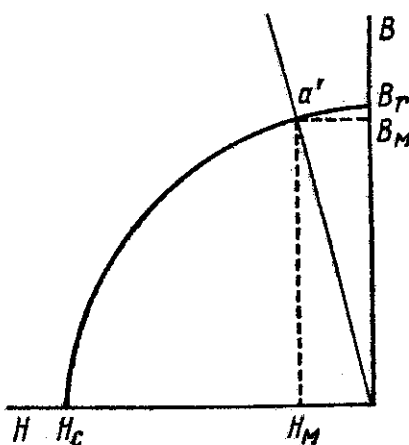
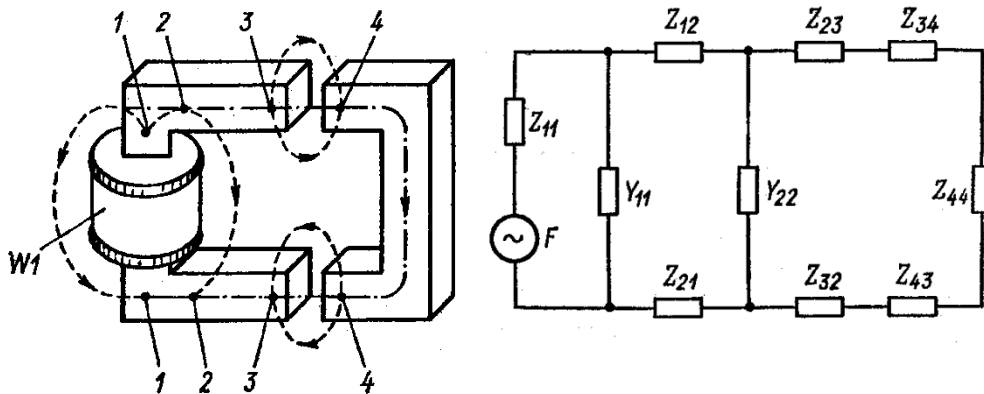


Рис.7.3. Зависимость индукции от напряженности магнитного материала

Пример расчета системы с постоянным магнитом и варианты заданий приведены в [1].

## 8. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Расчет преобразователя складывается из определения его полного магнитного сопротивления и последующего вычисления его электрических параметров ( $L$ ,  $M$  или  $E$ ).



*Рис.8.1. Магнитная цепь электромагнитного преобразователя и схема ее замещения*

На рис.8.1 изображена магнитная цепь электромагнитного преобразователя с обмоткой  $W1$ , число витков которой равно  $w_1$ , и схема ее замещения. Полное сопротивление обмотки  $W1$ , пренебрегая утечками магнитного потока, можно записать в виде

$$\begin{aligned} Z &= R_0 + j\omega w_1^2 / Z_m = R_0 + j\omega w_1^2 / (Z_{mFe} + R_\delta) = \\ &= R_0 + \omega w_1^2 X_m / ((R_\delta + R_m)^2 + X_m^2) + j\omega w_1^2 (R_\delta + R_m) / ((R_\delta + R_m)^2 + X_m^2) = \\ &= R_{эKB} + j\omega L, \end{aligned}$$

где  $R_0$  — сопротивление обмотки постоянному току;  $Z_{mFe}$  — магнитное сопротивление ферромагнитной части магнитной цепи, которое при работе преобразователя на переменном токе следует считать комплексным:  $Z_{mFe} = R_m + jX_m$ , ( $X_m$  отражает потери в стали на гистерезис и вихревые токи);  $R_\delta = 2\delta / (\mu_0 S)$  — сопротивление воздушного зазора;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость воздуха;  $\delta$  и  $S$  — длина и площадь зазора.

Расчет магнитной цепи электромагнитного преобразователя с учетом сопротивления утечек производится на основе схемы замещения магнитной цепи (рис.8.1). Для упрощения расчета в большинстве случаев можно предположить сосредоточенными комплексные магнитные сопротивления отдельных участков стальной цепи  $Z_1$  —  $Z_4$ , магнитные сопротивления воздушных зазоров  $R_{\delta 1}$  и  $R_{\delta 2}$  и проводимости путей утечек  $Y_{11}$  и  $Y_{22}$ .

Расчет сопротивления каждого из стальных участков зависит от значения индукции в материале, определяющего значение  $\mu$  (рис.8.2), и от степени проявления поверхностного эффекта в материале.

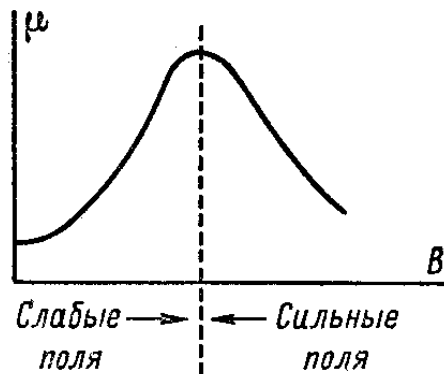


Рис.8.2. Зависимость  $\mu=f(B)$  ферромагнитного материала

Поверхностный эффект необходимо учитывать, если толщина листа или сплошного магнитопровода  $a > 2z_{0,05}$ , где  $z_{0,05}$  — глубина проникновения электромагнитной волны в материал (т. е. глубина затухания ее на 95%);  $z_{0,05}$  уменьшается с увеличением частоты как  $z_{0,05}=k/\sqrt{\omega}$ . Для стали, например, при частоте 50 Гц  $z_{0,05}=1\div 2$  мм.

В постоянном магнитном поле магнитное сопротивление каждого участка рассчитывается как  $R_{mi} = l_i/(\mu S_i)$ , где  $l_i$ ,  $\mu$ ,  $S_i$  — длина, магнитная проницаемость и площадь поперечного сечения  $i$ -го участка.

В переменном магнитном поле при отсутствии или слабом проявлении поверхностного эффекта (когда напряженность поля уменьшается по сечению от периферии к центру, но потоком заполнено еще все сечение стали) активная  $R_{mi}$  и реактивная  $X_{mi}$  составляющие сопротивления каждого участка цепи рассчитываются по формулам:

$$R_{mi} = l_i/(\mu S_i); X_{mi} = P_{ст}/(\omega \Phi_i^2),$$

где  $\Phi_i$  — действующий поток;  $P_{ст}$  — мощность потерь на гистерезис и вихревые токи.

При сильном проявлении поверхностного эффекта магнитные сопротивления определяются не площадями  $S_i$ , а периметрами  $u_i$  сечений ферромагнитных участков:

$$R_{mi} = \rho l_i/u_i; X_{mi} = \chi l_i/u_i,$$

где  $\rho$  и  $\chi$  — удельные поверхностные сопротивления, зависящие от свойств материала, частоты и линейной плотности магнитного потока  $\Phi_i/u_i$ . На рис.8.3 приведены экспериментальные кривые  $\rho$  и  $\chi$  в функции  $\Phi/u$  для мягкой стали при  $f = 50$  Гц (образец испытывался в режиме синусоидального потока). Кривыми можно пользоваться и при других частотах, принимая

$$\rho_f = \rho_{50} \sqrt{f/50} \text{ и } \chi_f = \chi_{50} \sqrt{f/50}; (\Phi/u)_f = (\Phi/u)_{50} \sqrt{f/50}.$$

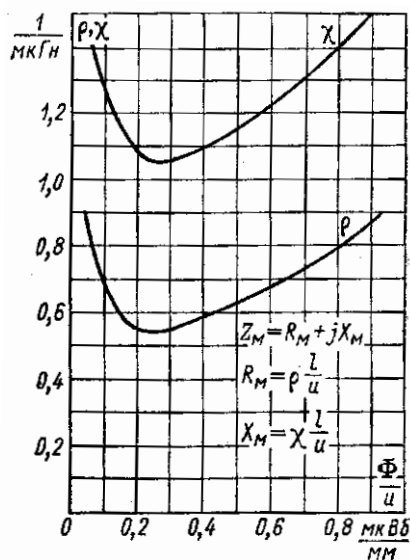


Рис.8.3. Кривые  $\rho$  и  $\chi$  в функции  $\Phi/u$  для мягкой стали при  $f = 50$  Гц

Расчет магнитных проводимостей зазоров и путей утечек через воздух производится по обычным формулам, применяемым при расчете магнитных цепей постоянного тока. Магнитное сопротивление зазора при поперечных размерах зазора, много больших его длины  $\delta$ , определяется формулой  $R_\delta = \delta / (\mu_0 S)$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость воздуха и  $S$  — площадь поперечного сечения зазора. Однако в большинстве случаев приходится учитывать, что параллельно проводимости зазора включаются проводимости утечек с боковых поверхностей и ребер полюсов. При этом относительная величина  $G_{\Sigma\text{ут}}/G_\delta$  и, следовательно, значение потока, идущего мимо рабочего зазора, будут тем больше, чем больше отношение  $\delta/a$ , где  $a$  — сторона полюса. Равномерность распределения индукции в зазоре также зависит от относительных размеров полюса и зазора. На рис.8.4 приведена кривая распределения индукции в зазоре под полюсами при условии, что все сечение полюса занято магнитным потоком, т. е. поверхностный

эффект отсутствует. Из кривой видно, что у краев зазора, на расстоянии от края, примерно равном  $\delta$ , начинается спад индукции.

Кривая спада индукции меняет свою кривизну, точка перегиба соответствует координате  $(0,5a+0,4\delta)$ . Чтобы обеспечить равномерность индукции в зазоре, рекомендуется выбирать  $a$  не менее  $(8\div 10)\delta$ .

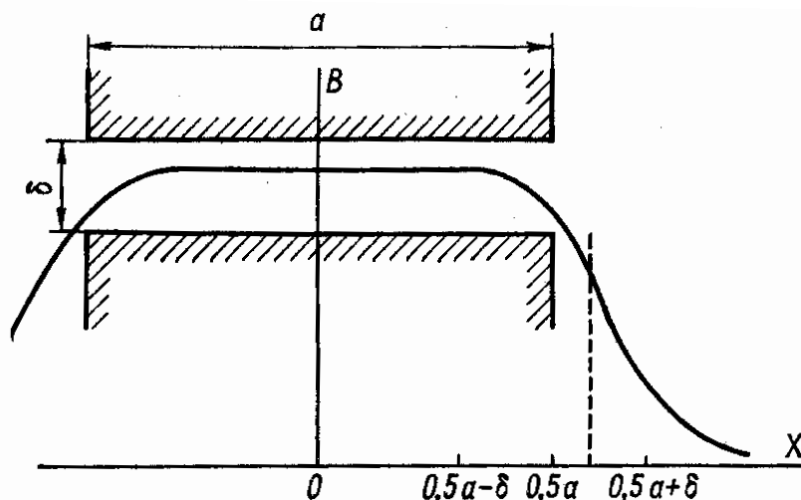


Рис.8.4. Кривая распределения индукции в зазоре под полюсами

При резко выраженном поверхностном эффекте магнитный поток вытесняется по периферии полюса, индукция в зазоре распределяется неравномерно и при увеличении зазора сопротивление его растет незначительно, так как увеличение  $\delta$  влечет за собой распространение силовых линий к центральной части полюса, т.е. увеличение эффективной площади полюса, замедляющее рост  $R_\delta$ . Поэтому при резко выраженном поверхностном эффекте рекомендуется сужать поперечные размеры торца полюса до величины  $a = 2z_{0,05}$ .

МДС преобразователя определяет ряд величин, от которых зависят такие важные характеристики преобразователей, как чувствительность, точность, потребление мощности и габариты. Очевидно, что чем больше число витков обмотки и соответственно ее индуктивность  $L = w^2/Z_M$  и чем больше ток через обмотку, тем больший при прочих равных условиях выходной сигнал (например, в виде изменения напряжения на преобразователе) сумеем получить с этого преобразователя. Однако увеличение числа витков приведет к увеличению габаритов обмотки или при заданных габаритах потребуется намотка более тонким проводом и увеличится активное

сопротивление обмотки. Увеличение МДС приведет также к увеличению активной мощности, выделяющейся в преобразователе и вызывающей его нагрев, что, в свою очередь, может привести к появлению погрешностей.

Таким образом, выбор МДС и числа витков обмотки электромагнитного преобразователя должен производиться при комплексном учете ряда факторов. Связь некоторых из них с МДС и числом витков рассмотрена ниже.

1. Полная мощность преобразователя, которую в первом приближении можно принять равной его реактивной мощности, определяется как  $P_p = \omega F \Phi$ , где  $F$  — МДС;  $\Phi$  — магнитный поток. Мощность преобразователя  $P_p$  должна быть в десятки-сотни раз больше требуемой выходной мощности.

2. Температура нагрева катушки  $\Theta$  определяется удельной тепловой нагрузкой преобразователя, равной  $\xi \Theta = P/S_{\text{охл}}$ , где  $P = I^2 R_{\text{эКВ}} = I^2 (R_0 + \omega w^2 X_M Z_M^2)$  — активная мощность преобразователя;  $S_{\text{охл}}$  — поверхность охлаждения катушки.

3. Сопротивление обмотки постоянному току

$$R_0 = \rho \omega \pi D_{\text{ср}} / (\pi d_n^2 / 4),$$

где  $D_{\text{ср}}$  — средний диаметр витков катушки;  $d_n$  — диаметр проволоки. При заданной площади  $S_{\text{окн}}$  окна катушки и коэффициенте укладки  $k_y$  число витков определяется из выражения  $w = 4 S_{\text{окн}} k_y / (\pi d_n^2 / 4)$ . Найдя отсюда  $d_n$  и подставив в уравнение  $R_0$ , получим  $R_0 = \pi \rho D_{\text{ср}} w^2 / (S_{\text{окн}} k_y)$ .

4. Активная мощность, выделяемая в преобразователе, равна

$$P = I^2 R_{\text{эКВ}} = I^2 w^2 (\rho \pi D_{\text{ср}} / (S_{\text{окн}} k_y) + \omega X_M / Z_M^2),$$

или учитывая, что  $I = U/Z$  и пренебрегая при расчете  $Z$  сопротивлением постоянному току  $R_0$  получим тоже выражение в несколько ином виде:

$$P = (U Z_M / (w \omega))^2 (\rho \pi D_{\text{ср}} / (S_{\text{окн}} k_y) + \omega X_M / Z_M^2)$$

Активная мощность  $P$  должна быть меньше допустимой по нагреву:  $P \leq \xi S_{\text{охл}} \Theta_{\text{доп}}$ . Величину  $\xi$  рекомендуется ограничить значением 50—100 Вт/м<sup>2</sup> (50—100 мкВт/мм<sup>2</sup>).

5. Электромеханическая сила притяжения якоря к сердечнику равна

$$F_{\text{эм}} = S \mu_0 (I w)^2 / \delta^2 = S \mu_0 (U Z_M / (w \omega))^2 / \delta^2.$$

6. Магнитный поток равен  $\Phi = Iw/Z_m$ . Если пренебречь падением напряжения на сопротивлении  $R_0$ , значение потока можно определить из формулы  $\Phi = U/(w\omega)$ . Допустимое значение потока определяется по выбранному значению индукции  $B$  или при резком проявлении поверхностного эффекта по выбранному значению  $\Phi/u$ .

Приведенные выше формулы позволяют определить допустимую МДС обмотки, т. е. произведение  $Iw$ , или, что чаще бывает удобнее, отношение  $U/w$ . В малогабаритных преобразователях выбор МДС ограничивается нагревом катушки собственным током. В измерительных механизмах выбор МДС определяется допустимым потреблением механизма, а также допустимым значением индукции в магнитопроводе, так как увеличение индукции приводит к появлению погрешности, вызываемой магнитным гистерезисом.

В индуктивных и магнитоупругих преобразователях желательно создать такую индукцию в магнитопроводе, чтобы магнитная проницаемость стальных участков была максимальной, или при резко выраженном поверхностном эффекте обеспечить такое значение  $\Phi/u$ , чтобы удельные магнитные сопротивления  $\rho$  и  $\chi$  были минимальными. При этом сопротивление преобразователя  $Z$  практически не зависит от колебания напряжения источника питания. В индуктивных преобразователях, используемых в приборах для измерения малых сил и давлений, где якорь преобразователя выполнен в виде мембраны или закреплен слабой пружиной, МДС ограничивается допустимой силой притяжения  $F_{эм}$ , которая должна быть намного меньше измеряемой.

При заданном напряжении на обмотке преобразователя или токе через нее число витков обмотки определяется однозначно. Однако в ряде случаев, в особенности для преобразователей неэлектрических величин, напряжение питания можно выбирать произвольно, используя трансформатор. В этом случае число витков выбирается по требуемому сопротивлению преобразователя  $Z \approx \omega w^2/Z_m$ . Если преобразователь работает с усилителем, имеющим большое входное сопротивление, число витков берется возможно большим. При необходимости получения максимальной выходной мощности нужно выполнить условие согласования сопротивления преобразователя с последующей измерительной цепью и отсюда найти число витков. При выборе числа витков в любом случае нужно кроме

вышесказанного иметь в виду следующее: напряжение питания по технике безопасности не должно превышать 200÷300 В, диаметр провода по технологическим соображениям нежелательно брать слишком малым и при большом числе витков ( $w > 100$ ) диаметр выбирается не менее 0,07 мм.

При измерении динамических величин частота источника питания должна быть больше частоты измеряемого процесса, чтобы измеряемая величина воспроизводилась без заметных искажений. Если же частота измеряемого процесса невелика, то можно питать преобразователь от сети переменного тока частоты 50 Гц. Однако, как видно из приведенных выше формул, повышение частоты при заданной активной мощности, а также при заданных МДС или магнитном потоке, позволяет повысить напряжение питания преобразователя. Повышение напряжения питания позволяет увеличить выходной сигнал преобразователя. Однако увеличение выходного сигнала будет пропорционально повышению напряжения питания лишь до тех пор, пока при возрастании частоты не происходит резкого возрастания магнитного сопротивления и магнитных потерь в магнитопроводе из-за поверхностного эффекта. Возрастание магнитного сопротивления ферромагнитных участков приводит, с одной стороны, к уменьшению относительного изменения полного магнитного сопротивления под действием измеряемой величины и, с другой, как видно из приведенных выше формул,— к ограничению напряжения питания. Поэтому при использовании магнитопроводов из сплошного материала не рекомендуется выбирать частоту выше 100÷200 Гц. При использовании сердечника из листового материала можно увеличить частоту питания до 1÷10 кГц, а при использовании ферритовых сердечников — до 100÷300 кГц.

Пример расчета электромагнитного преобразователя (электромагнитной системы индуктивного измерительного преобразователя) и варианты заданий приведены в [1].

## 9. АНАЛИЗ ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ЦЕПЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

### 9.1. Обобщенная информационная модель получения и передачи информации

Предполагается, что любой процесс преобразования информации не зависимо от физической природы может быть представлен в виде совокупности элементарных преобразований одной физической величины в другую, каждая из которых в первом приближении может быть описана *линейной зависимостью*. При этом рассматриваются лишь такие явления, которые сопровождаются расходом энергии. Целью такого обобщения является идея предложить для всех процессов независимо от их природы прямо пропорциональные зависимости между *величинами*, характеризующими процесс, и *параметрами*, характеризующими физические константы и размеры объекта, в пределах которых процесс протекает. При этом предполагается, что какой бы ни был сложный процесс, он может быть описан бесконечно большим сочетанием коррелированных между собой элементарных прямо пропорциональных зависимостей. В процессе анализа какого-либо преобразования в нем выделяются элементарные явления определенной физической природы (тепловой, электрической, магнитной, оптической, механической и т.д.) и предполагается, что каждое такое явление есть *реакция* цепи рассматриваемой физической природы на воздействия на эту цепь. Цепью определенной физической природы назовем материальную среду, имеющую геометрические размеры и характеризующуюся физическими константами, присущими явлениям этой физической природы. Для определения связи между воздействием и реакцией рассматриваемой цепи введем понятие *величины воздействия* и *реакции* и понятие *параметров цепи*. Величины служат для внешнего описания процесса и имеют различные значения для одной и той же цепи. Параметры характеризуют относительную неизменность материальной среды при отсутствии влияния соседних цепей другой физической природы.

Предполагаемая информационная модель оперирует следующими понятиями:  $U$  – величина воздействия,  $I$  – величина реакции,  $q$  – суммарная величина реакции (заряд),  $R$  – параметр

сопротивления,  $C$  – параметр емкости,  $L$  – параметр индуктивности.

Для выявления перечисленных величин и параметров в цепи какой-либо конкретной физической природы необходимо, чтобы физико-математическая модель этой цепи включала уравнения, связывающие энергию, затраченную на протекание процесса, с геометрическими размерами цепи и ее физическими константами. Кроме этих основных понятий полезно ввести ряд дополнительных понятий:  $G=1/R$  - параметр проводимости,  $W=1/C$  - параметр жесткости,  $D=1/L$  - параметр дедуктивности.

## 9.2. Критерии выявления величин и параметров

Для выявления величин и параметров в цепях различной физической природы используются основные и производные **критерии**, которые представляют собой определенные элементарные зависимости между величинами и параметрами внутри цепи одной физической природы. В соответствии с этими критериями и физическими моделями, предлагаемыми физиками для описания рассматриваемых процессов в цепи определенной физической природы, определяются величины и параметры этой цепи.

Критерий 1 (энергетический).

Произведение величины воздействия на величину реакции должно измеряться в единицах мощности независимо от природы процесса, протекающего в рассматриваемой цепи:

$$UI=P, [\text{Вт}]. \quad (9.1)$$

Критерий 2 (критерий интенсивности).

Величина реакции равна первой производной по времени от величины заряда:

$$I=dq/dt. \quad (9.2)$$

Критерий 3 (статический).

Произведение величины реакции на параметр сопротивления равно величине воздействия:

$$U=IR. \quad (9.3)$$

Критерий 4 (динамический 1-ого рода).

Величина реакции равна первой производной по времени от произведения величины воздействия на параметр емкости:

$$I=d(UC)/dt. \quad (9.4)$$

Критерий 5 (динамический 2-ого рода).

Величина воздействия равна первой производной по времени от произведения величины реакции на параметр индуктивности.

$$U=d(IL)/dt . \quad (9.5)$$

Следует отметить, что чем больше количество критериев соблюдается при выявлении величин и параметров тем меньше число вариантов величин и параметров может быть предложено. Например, если при попытке выявить величины воздействия и реакции с использованием только первого критерия может быть предложено несколько вариантов величин, удовлетворяющих физическим моделям рассматриваемого процесса, то уже использование совокупности первого и второго критериев уменьшает число таких вариантов. Но даже при использовании совокупности всех пяти критериев может быть предложено более одного варианта. Каждый из вариантов может в дальнейшем с одинаковым успехом использоваться в информационной модели. Если выявлены не все величины и параметры, что возможно в случае, когда используется неполная совокупность критериев, либо когда физическая модель не достаточно полно раскрывает рассматриваемый процесс, то даже неполное число выявленных величин и параметров может быть использовано в информационной модели, при этом эффективность использования модели снижается.

В настоящее время выявлены величины и параметры для следующих цепей: электрической, магнитной, механической, пневмогидравлической, акустической, тепловой, диффузионной, оптической.

Названия цепей условные и подчеркивают лишь принадлежность используемых физических эффектов к тем или иным традиционно принятым названиям явлений, сопровождаемых этими эффектами.

Помимо основных критериев в ряде случаев используются **производные** от основных критериев:

1) Критерий характеризует процесс в емкости и заключается в равенстве величины заряда произведению величины воздействия на параметр емкости:

$$q=UC. \quad (9.6)$$

Этот критерий получен из критерия интенсивности (9.2) и динамического критерия 1-го рода (9.4).

2) Частный случай динамического критерия 1-ого рода, заключается в равенстве первой производной по времени от

величины воздействия произведению величины реакции на параметр жесткости при условии, что параметры жесткости или емкости в рассматриваемой цепи постоянны во времени:

$$dU/dt=IW, W=1/C=\text{const}, dC/dt=0. \quad (9.7)$$

3) Частный случай динамического критерия 1-го рода заключается в равенстве величины реакции произведению величины воздействия на первую производную по времени от параметра емкости при условии, что величина воздействия постоянна:

$$I=U \cdot dC/dt, U=\text{const}. \quad (9.8)$$

4) Частный случай динамического критерия 2-го рода, заключается в равенстве первой производной по времени от величины реакции произведению величины воздействия на параметр дедуктивности при условии, что дедуктивность не изменяется во времени:

$$dI/dt=UD, D=1/L=\text{const}. \quad (9.9)$$

5) Частный случай динамического критерия 2-ого рода, заключается в равенстве величины воздействия произведению величины реакции на производную по времени от параметра индуктивности при условии, что величина реакции не изменяется во времени:

$$U=I \cdot dL/dt, I=\text{const}. \quad (9.10)$$

При выявлении величин и параметров из анализа физических объектов в цепи той или иной физической природы желательно так подобрать аналитические выражения параметров, чтобы в числитель и знаменатель этого выражения входили соответствующие геометрические размеры цепи.

### 9.3. Величины и параметры цепей различной природы

Выше было оговорено, что число вариантов комплекса величин и параметров той ли иной природы могут быть больше 1. Однако при анализе работы какого-либо преобразователя необходимо пользоваться только комплексом величин и параметров, т.к. каждому варианту соответствует вполне определенные размерности выявленных величин и параметров.

Рассмотрим возможные варианты комплексов величин и параметров для электрической, магнитной, механической, пневмогидравлической, тепловой, диффузионной, акустической и оптической цепей. Варианты комплексов величин и параметров выявлены по перечисленным ранее критериям и приведены в таблице 9.1. В этой таблице введены следующие обозначения:

$S_i$  - площадь поперечного сечения цепи  $i$ -ой природы, [  $m^2$  ];  
 $l_i$  - длина цепи  $i$ -ой природы, [  $m$  ];  
 $\rho_0$  - предельное электрической сопротивление, [  $Om \cdot m$  ];  
 $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость, [  $\Phi/m$  ];  
 $\mu$  - магнитная проницаемость, [  $Гн/m$  ];  
 $K_f$  - коэффициент трения,  $c/m$ ;  
 $P_r$  - нормальное давление, [  $Па = \frac{H}{m^2}$  ];  
 $S_r$  - трущаяся площадь, [  $m^2$  ];  
 $T_{cp}$  - средняя температура цепи, [ ];  
 $V$  - объем, [ ];  
 $\lambda_{II}$  - динамическая вязкость, [  $Па \cdot c$  ];  
 $\gamma$  - удельный вес, [  $\frac{H}{m^3}$  ];  
 $a$  - скорость звука в среде, [  $m/c$  ];  
 $\rho$  - плотность, [  $\frac{кг}{m^3}$  ];  
 $g \approx 9,81 \cdot m/c^2$  - ускорение свободного падения;  
 $\lambda_T$  - коэффициент теплопроводности, [  $\frac{Дж}{m \cdot c \cdot K}$  ];  
 $C_T$  - удельная теплоемкость, [  $\frac{Дж}{кг \cdot K}$  ];  
 $\lambda$  - длина свободного пробега, [  $m$  ];  
 $m$  - масса тела или частицы, [  $кг$  ];  
 $D$  - коэффициент диффузии, [  $m^2/c$  ];  
 $\omega$  - циклическая частота, [  $рад/c$  ];  
 $\lambda_a$  - длина волны, [  $m$  ];  
 $A$  - амплитуда колебаний среды;  
 $T$  - период колебаний, [  $c$  ];  
- коэффициент потерь;  
 $c_K \approx 3 \cdot 10^8 \cdot m/c$  - скорость света;  
 $n_\Sigma$  - число фотонов, падающих на поверхность в начале цепи;  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-38}$ , [  $Дж \cdot K$  ] - постоянная Планка;  
 $\nu$  - частота волны, [  $Гц$  ];  
 $\nu_{cp}$  - частота, характерная для среды, [  $Гц$  ].

Таблица 9.1 – Варианты комплексов величин и параметров цепей различной природы

Природа цепи	Величины			Параметры		
	Воздействие $U$	Реакция $I$	Заряд $q$	Сопротивление $R$	Емкость $C$	Индуктивность $L$
Электрическая $i = \mu$	$U_3 = \varphi_1 - \varphi_2$ , [В] (напряжение)	$q_3$ , [А] (ток)	$q_3$ , [Кл]	$R_3 = \rho_3 \cdot \frac{l_3}{S_3}$ , [Ом]	$C_3 = \varepsilon \cdot \frac{S_3}{l_3}$ , [Ф]	$L_3 = \mu \cdot \frac{S_\mu \cdot w_3^2}{l_\mu}$ , [Гн]
Магнитная $i = \mu$	$U_\mu = I_3 w_3 = H \cdot l_\mu$ , [А] (МДС)	$I_\mu = \frac{d\Phi}{dt}$ , [В] (ЭДС)	$q_\mu = \Phi$ , [Вб] (поток)	$R_\mu = \frac{S_3}{\rho_3 \cdot l_3}$ , [Сим]	$C_\mu = \mu \cdot \frac{S_\mu}{l_\mu}$ , [Гн]	$L_\mu = \varepsilon \cdot \frac{S_3}{l_3}$ , [Ф]
Пневмогидравлическая $i = \Pi$	$U_\Pi = p_1 - p_2$ , [ $\frac{H}{M^2}$ ] (разность давлений)	$I_\Pi = \frac{dV}{dt}$ , [ ] (объемная скорость) $\frac{M^3}{M \cdot c}$	$q_\Pi = V$ , [М <sup>3</sup> ] (объем)	$R_\Pi = \frac{8 \cdot \gamma \cdot \lambda_\Pi \cdot l_\Pi}{g \cdot \rho \cdot S_\Pi^2}$ , [ $\frac{H \cdot c}{M^5}$ ]	$C_\Pi = \frac{S_\Pi \cdot l_\Pi}{\rho \cdot a^2}$ , [ $\frac{M^5}{H}$ ]	$L_\Pi = \rho \cdot \frac{l_\Pi}{S_\Pi}$ , [ $\frac{K^2}{M^4}$ ]
Механическая $i = M$	$U_M = F$ , [Н] (сила)	$I_M = \frac{dx}{dt} = v$ , [ ] (скорость) $\frac{M}{M}$	$q_M = x$ , [М] (перемещение)	$R_M = K_f \cdot P_r \cdot S_r$ , [ $\frac{H \cdot c}{M}$ ]	$C_{,M} = \frac{l_M}{S_M \cdot P_r}$ , [ $\frac{H}{M}$ ]	$L_M = m$ , [кг]
Тепловая $i = T$	$U_T = T_1 - T_2$ , [К] (разность температур)	$I_T = \frac{dS}{dT}$ , [ $\frac{Bm^c}{K}$ ]	$q = \frac{Q}{T_{cp}} = S$ , [ $\frac{Дж}{K}$ ] (энтропия системы)	$R_T = \frac{T_{cp} \cdot l_T}{\lambda_T \cdot S_T}$ , [ $\frac{K^2}{Bm}$ ]	$C_T = \frac{\rho \cdot S_T \cdot l_T \cdot c_T}{T_{cp}}$ , [ $\frac{Дж}{K^2}$ ]	—

Диффузионная $i = D$	$U_D = n_1 - n_2$ , [ $\frac{1}{M^3}$ ] (разность концентра- ций)	$I_D = m \cdot D^3 \cdot \lambda \cdot S_D \cdot \frac{n_1 - n_2}{l_D}$ , [ $\frac{\kappa Z \cdot M^5}{C^3}$ ]	$q_a = n_D \cdot m \cdot V \cdot D^3 \cdot \lambda$ , [ $\frac{\kappa Z \cdot M^5}{C^2}$ ]	$R_D = \frac{l_D}{m \cdot D^3 \cdot \lambda \cdot S_D}$ , [ $\frac{C^3}{\kappa Z \cdot M^8}$ ]	$C_D = m \cdot V \cdot D^3 \cdot \lambda$ , [ $\frac{\kappa Z \cdot M^3}{C^2}$ ]	—
Акустическая $i = a$	$U_a = \omega \cdot a \cdot \rho \cdot A$ , [ $\frac{\kappa Z}{M \cdot C^2}$ ] (звуковое давление)	$I_a = \frac{\lambda_a \cdot S_a}{T} \cdot S_a$ , [ ] $\frac{M^3}{C}$	$q_a = \lambda_a \cdot S_a$ , [ $M^3$ ]	$R_a = \frac{a \cdot \rho \cdot A}{S_a \cdot \lambda_a}$ , [ $\frac{\kappa Z}{M^4 \cdot C}$ ]	$C_a = \frac{\lambda_a \cdot S_a}{a \cdot \omega \cdot \rho \cdot A}$ , [ $\frac{M^4 \cdot C^2}{\kappa Z}$ ]	—
Оптическая $i = 0$	$U_0 = \frac{n \cdot v \cdot c^3 \cdot k \cdot l_0}{v_{cp}^4 \cdot S_0}$ [ ] $\frac{M}{C}$	$I_0 = \frac{n \cdot h \cdot v}{c}$ , [H] $n = \frac{dn_{\Sigma}}{dt}$	$q_0 = \frac{n_{\Sigma} h v}{c}$ , [H·c]	$R_0 = \frac{K \cdot c^4 \cdot l_0}{h \cdot v_{cp}^4 \cdot S_0}$ , [ $\frac{M}{H \cdot c}$ ]	$C_0 = \frac{n_{\Sigma} \cdot h \cdot v_{cp}^4 \cdot S_0}{n \cdot c^4 \cdot k \cdot l_0}$ , [ $\frac{H \cdot c^2}{M}$ ]	—

## 9.4. Пример расчета и варианты заданий

**Пример 9.4.1.** Пользуясь основными и производными критериями (9.1)-(9.10), а также размерностью выявленных величин и параметров (таблица 9.1) проверить (проанализировать) правильность заполнения строки для цепи магнитной природы.

По основному критерию 2 (9.2) для магнитной цепи:  $I_\mu = dq_\mu/dt = d\Phi/dt$  при  $q_\mu = \Phi$ . По основному критерию 3 (9.3) сопротивление магнитной цепи:  $R_\mu = U_\mu / I_\mu = I_3 w_3 / (d\Phi/dt)$ , [А/В]. Такая размерность соответствует размерности электрической проводимости - [Сим]. По производному критерию 2 (9.7)  $dU_\mu/dt = I_\mu / C_\mu$ , а после интегрирования получим  $U_\mu = q_\mu / C_\mu$ , [А]=[Вб/Гн]. Такое соотношение размерностей соответствует выражению для МДС через магнитный поток и магнитную проводимость:  $F = \Phi / G$ . По производному критерию 4 (9.9)  $dI_\mu/dt = U_\mu / L_\mu$ , откуда  $L_\mu = U_\mu / (dI_\mu/dt)$ . Анализируя размерность последнего выражения получим  $[\Phi] = [А/В/с]$  или  $[\Phi] = [с/Ом]$ , а после преобразования  $[Ом \cdot \Phi] = [с]$ , что верно. С другой стороны, подставим вместо величин и параметров их физические аналоги:  $C = iw / (d(d\Phi/dt)/dt)$ ; после преобразования и интегрирования:  $w(d\Phi/dt) = 1/C \int i dt$  или  $u = q/C$ ; наконец  $q = C \cdot u$ , что тоже верно.

В качестве вариантов заданий предлагается проанализировать подобным образом другие цепи из таблицы 9.1.

## 10. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ДЛЯ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 10.1. Эквивалентные электрические схемы

В измерительной технике часто используются такие преобразователи, частотные характеристики которых определяются частично электрическими, а частично механическими (или акустическими) параметрами. В подобных случаях удобнее все параметры привести к какому-то единому (лучше электрическому) виду и весь преобразователь изобразить в виде некоторой эквивалентной (т. е. обладающей теми же частотными свойствами) электрической цепи, которая отразила бы как электрические, так и

механические элементы. Это может быть достигнуто методом, который получил название метода эквивалентных схем или электрических схем замещения и основывается на общности дифференциальных уравнений электрических и механических систем.

На рис. 10.1 показаны механическая колебательная система и ее электрический аналог в виде последовательного и параллельного контуров.

Дифференциальное уравнение механической системы может быть записано в виде

$$m \cdot d^2x/dt^2 + P \cdot dx/dt + W \cdot F = F \quad (10.1)$$

или в виде 
$$m \cdot dv/dt + P \cdot v + W \cdot \int v \cdot dt = F, \quad (10.2)$$

где  $F$  — приложенная сила;  $m$  — масса подвижной части;  $P$  — коэффициент успокоения, характеризующий вязкое трение;  $W$  — жесткость пружины;  $x$  — перемещение подвижной части;  $v = dx/dt$  — скорость движения подвижной части.

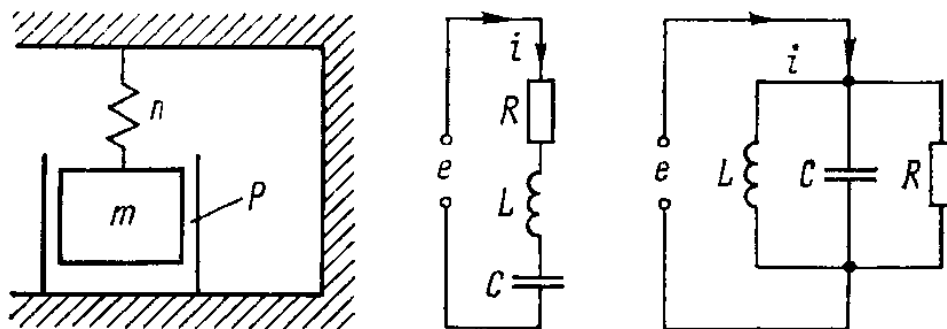


Рис.10.1. Механическая колебательная система и ее электрический аналог в виде последовательного и параллельного контуров

Дифференциальное уравнение последовательного контура может быть записано в виде

$$L \cdot d^2q/dt^2 + R \cdot dq/dt + 1/C \cdot q = e. \quad (10.3)$$

Дифференциальное уравнение параллельного контура

$$C \cdot de/dt + e/R + 1/L \cdot \int e \cdot dt = i. \quad (10.4)$$

Сравнение дифференциальных уравнений (10.1), (10.2) и (10.3), (10.4) показывает, что механическая система может быть заменена как последовательным, так и параллельным электрическим контуром. В таблице 10.1 представлены электрические аналоги механических параметров для того и другого контура.

Таблица 10.1 - Электрические аналоги механических параметров

Механическая величина	Электрическая величина	
	последовательного контура	параллельного контура
Сила $F$	ЭДС $e$	Ток $i$
Скорость $v$	Ток $i$	ЭДС $e$
Перемещение $x$	Заряд $q$	Магнитный поток $\Phi$
Количество движения $p$	Магнитный поток $\Phi$	Заряд $q$
Успокоения $P$	Сопротивление $R$	Проводимость $1/R$
Масса $m$	Индуктивность $L$	Емкость $C$
Жесткость $W$	Емкость $C$	Индуктивность $L$

Метод электромеханических аналогий широко применяется при расчете измерительных преобразователей. Для сопоставления эквивалентной схемы нужно выбрать электрический аналог механической системы и определить коэффициент электромеханической связи  $k_{эм}$ , равный  $k_{эм} = F/e = -i/v$  для последовательной схемы и  $k_{эм} = F/i = -U/v$  для параллельной схемы. Элемент связи между реальной электрической цепью и электрическим аналогом механической системы представляет собой идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации, равным  $k_{эм}$ . Особенностью трансформатора является то, что его коэффициент трансформации измеряется в ньютонах на вольт или на ампер. Приведя все сопротивления и проводимости к первичной обмотке трансформатора, можно составить окончательную эквивалентную схему — электрическую схему замещения, которая отражает действительные свойства системы со стороны электрических зажимов.

Сущность метода эквивалентных схем, или электрических схем замещения, рассмотрим на примере преобразователей с электромагнитной и электростатической связью механической и электрической систем, наиболее распространенных в измерительной технике.

## 10.2. Эквивалентные схемы электромеханических преобразователей с электромагнитной связью

Примерами таких преобразователей могут служить магнитоэлектрический преобразователь тока  $I$  в силу  $F$ , схематически показанный на рис.10.2, или магнитоэлектрический измерительный

механизм. Механическая система преобразователя обладает массой  $m$ , подвешенной на пружине с жесткостью  $W$ , и имеет успокоение  $P$ , обусловленное внутренним трением в элементах подвески и сопротивлением воздуха движению катушки в зазоре магнита. Электрическая система обладает сопротивлением  $R_0$  и индуктивностью  $L_0$  катушки преобразователя.

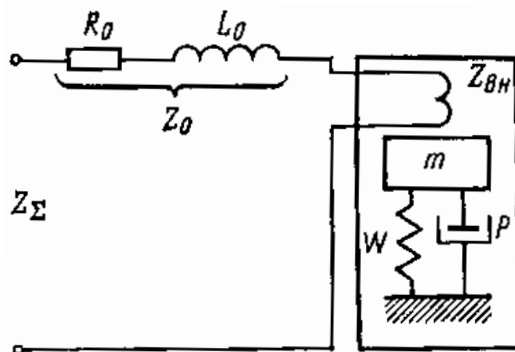


Рис.10.2. Схема магнитоэлектрического преобразователя

При измерении сопротивления такого преобразователя на постоянном токе обнаруживаем лишь сопротивление  $R_0$  его катушки. При повышении частоты питающего тока можно было бы ожидать повышения сопротивления по штриховой кривой на рис.10.3 соответствующей  $Z = \sqrt{R_0^2 + \omega^2 L_0^2}$ . Однако фактически наблюдаем повышение сопротивления преобразователя в виде резонансного пика на частоте  $f_p$ , соответствующей резонансу механической системы преобразователя и близкой к

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{W}{m}}.$$

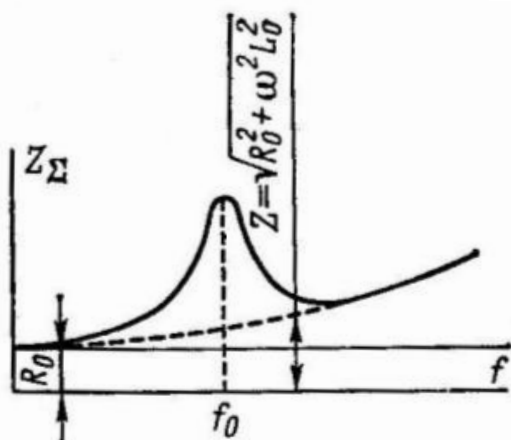


Рис.10.3. Зависимость  $Z_{\Sigma} = \varphi(f)$

Физически это явление объясняется так. В области механического резонанса резко нарастает амплитуда механических колебаний катушки в зазоре постоянного магнита, наводимая в катушке ЭДС направлена встречно внешнему возбуждающему напряжению, вычитается из него, и ток, проходящий через преобразователь, падает, что формально мы и воспринимаем как возрастание  $Z_{\Sigma}$  преобразователя. Это возрастание  $Z_{\Sigma}$  преобразователя можно представить как появление некоторого дополнительного электрического сопротивления  $Z_{вн}$ , вносимого механической системой и называемого вносимым сопротивлением.

Для установления вида связи электрических и механических параметров преобразователя уточним, как возникают механическая сила и встречная ЭДС в катушке преобразователя. Как известно, механическая сила  $F$ , возникающая от протекания по катушке тока  $i$ , равна  $F = iBl = k_{эм}i$ , где  $B$  — индукция в зазоре магнита;  $l$  — длина проводника катушки;  $k_{эм} = Bl$  — коэффициент электромагнитной связи.

ЭДС, наводимая в катушке при ее движении в магнитном поле постоянного магнита, равна  $e = -d\Phi/dt = -vBl = -k_{эм}v$ , где  $k_{эм} = Bl$  — тот же коэффициент электромагнитной связи, а  $v$  — скорость движения катушки.

Для составления полной системы уравнений обозначим  $R_0 + j\omega L_0 = Z_0$ , а отношение механической силы  $F$  к механической скорости  $v$  назовем комплексным механическим сопротивлением  $Z_{мх} = F / v$ . Тогда полная система уравнений, описывающая преобразователь, будет

$$\begin{aligned} u &= Z_0 i - k_{эм} v; \\ F &= Z_{мх} v + k_{эм} i, \end{aligned}$$

так как напряжение  $u$  на зажимах преобразователя складывается из падения напряжения от тока  $i$  на элементе  $Z_0$  и ЭДС  $e = -k_{эм}v$ , наводимой в катушке, а сила, развиваемая катушкой, — из силы  $Z_{мх}v$ , обусловленной ее движением, и силы  $k_{эм}i$ , создаваемой током.

Если внешняя сила  $F$ , развиваемая катушкой, равна нулю (преобразователь не нагружен на внешние устройства), то из второго уравнения следует, что

$$Z_{мх}v - k_{эм}i = 0 \text{ и } v = -k_{эм}i/Z_{мх}.$$

Полное электрическое сопротивление преобразователя

$$Z_{\Sigma} = u/i = (Z_0 i - k_{эм} v)/i = Z_0 - k_{эм} v/i,$$

а после подстановки значения  $v$

$$Z_{\Sigma} = Z_0 + k_{эм}^2 / Z_{мх} = Z_0 + Z_{вн},$$

т. е. складывается обычным образом из электрического  $Z_0$  и вносимого  $Z_{вн} = k_{эм}^2 / Z_{мх}$  сопротивлений преобразователя.

Особенностью связи  $Z_{вн}$  и  $Z_{мх}$  является их обратная пропорциональность друг другу: чем больше  $Z_{мх}$ , тем меньше  $Z_{вн}$ . В этом легко убедиться, сделав  $Z_{мх} = \infty$ , т. е. застопорив катушку, лишив ее возможности двигаться. При этом будет  $Z_{\Sigma} = Z_0$ ,  $Z_{вн} = 0$ , т. е. влияние механических параметров на  $Z_{\Sigma}$  исчезнет.

Для того чтобы уяснить, из каких электрических элементов может быть смоделировано в электрической цепи вносимое сопротивление  $Z_{вн}$ , обусловленное влиянием механических элементов преобразователя, воспользуемся вместо жесткости обратной ей величиной — податливостью  $n = 1/W$  и представим механическое сопротивление  $Z_{мх}$  в виде

$$Z_{мх} = F/v = r_{мх} + j(\omega m - 1/(\omega n)).$$

Тогда

$$Y_{вн} = \frac{1}{Z_{вн}} = \frac{Z_{мх}}{k_{эм}^2} = \frac{r_{мх}}{k_{эм}^2} + j\omega \frac{m}{k_{эм}^2} + \frac{1}{j\omega k_{эм}^2 n},$$

т. е. результирующая проводимость  $Y_{вн} = 1/Z_{вн}$  складывается из параллельно соединенных трех проводимостей, первая из которых не зависит от текущего значения частоты  $\omega$  и, следовательно, может быть смоделирована как

$$r_{мх} / k_{эм}^2 = 1/R_1,$$

вторая пропорциональна частоте  $\omega$ , т. е. в электрической цепи должна быть представлена емкостью с проводимостью

$$j\omega C_1 = j\omega m / k_{эм}^2,$$

а третья, обратно пропорциональная частоте, может быть смоделирована индуктивностью с проводимостью

$$1/(j\omega L_1) = 1/(j\omega k_{эм}^2 n).$$

Таким образом, результирующая эквивалентная схема преобразователя с массой  $m$ , податливостью  $n$  и активным механическим сопротивлением  $r_{мх}$  (успокоение  $P$ ) для воспроизведения частотной характеристики, показанной на рис.10.3, должна состоять из элементов, изображенных на рис.10.4 или 10.5, где  $R_1 = k_{эм}^2 / r_{мх}$ ;  $C_1 = m / k_{эм}^2$ ;  $L_1 = k_{эм}^2 n = k_{эм}^2 / W$ .

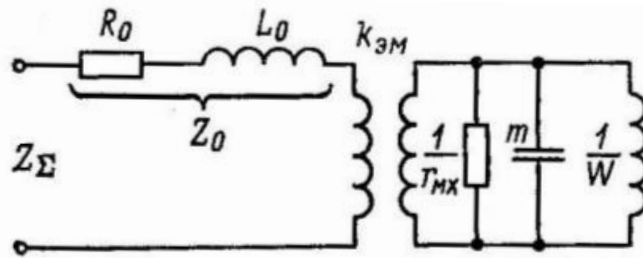


Рис.10.4. Эквивалентная схема с трансформаторной связью

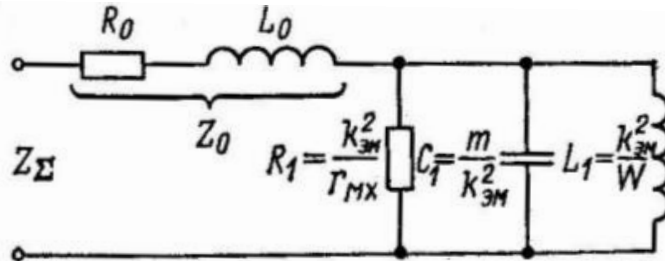


Рис.10.5. Эквивалентная схема без трансформаторной связи

В результате выбранный путь приводит к эквивалентной параллельной схеме и коэффициенту  $k_{эм} = F/i = Bl$ .

В том, что полученная эквивалентная схема (рис.10.4) действительно соответствует фактической частотной характеристике преобразователя, приведенной на рис.10.3 легко убедиться, просматривая характерные точки этой характеристики. В самом деле, при  $\omega = 0$  сопротивления катушек  $L_0$  и  $L_1$  равны нулю и  $Z_\Sigma = R_0$ . Резонансный пик характеристики (если пренебречь влиянием  $L_0$ ) определяется резонансом контура  $C_1 L_1$  и рассматривается вблизи собственной частоты

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{k_{эм}^2 n \frac{m}{k_{эм}^2}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{nm}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{W}{m}},$$

а при дальнейшем повышении частоты сопротивление конденсатора  $C_1$  стремится к нулю и  $Z_\Sigma = R_0 + j\omega L_0$ .

### 10.3. Эквивалентная схема поляризованного электромагнитного преобразователя

Поляризованный электромагнитный преобразователь изображен на (рис.10.6). Постоянное подмагничивание создается током  $I_0$  и МДС подмагничивания  $F_m = I_0 w$  или постоянным магнитом, имеющим МДС  $F_m = H l_m$  где  $H$  — напряженность и  $l_m$  — длина магнита. Поскольку электромагнитная сила определяется током, то, как и в предыдущем примере, удобнее выбрать параллельную эквивалентную схему.

Электромагнитная сила  $F_{эм} = 0,5 \cdot S \mu_0 (Iw)^2 / \delta^2$ , где  $\delta$  — длина зазора;  $S$  — площадь зазора;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;  $i = I_0 + I_m \sin \omega t$  — ток через преобразователь. Составляющая силы, имеющая частоту  $\omega$ , определяется как  $F_{эм} = S \mu_0 w (I_0 w) \cdot I_m \sin \omega t / \delta^2$ . Отсюда коэффициент электромеханической связи:  $k_{эм} = S \mu_0 w (I_0 w) / \delta^2 = S \mu_0 w F_M / \delta^2$ . Или если этот коэффициент выразить через подмагничивающий поток  $\Phi_0 = F_M S \mu_0 / \delta$ , то  $k_{эм} = \Phi_0 w / \delta$ . Эквивалентная схема остается той же, что и представленная на рис.10.5.

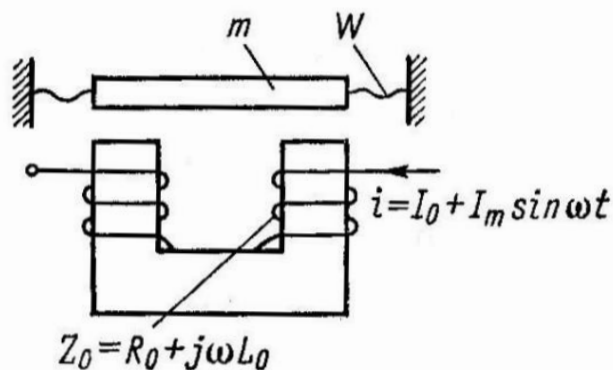


Рис.10.6. Схема поляризованного электромагнитного преобразователя

#### 10.4. Эквивалентная схема поляризованного электростатического преобразователя

Поляризованный электростатический преобразователь и его эквивалентные схемы изображены на (рис.10.7). Электростатическая сила между пластинами определяется напряжением между ними, поэтому удобнее выбрать последовательную эквивалентную схему. Электростатическая сила  $F_{эс} = 0,5 \cdot \epsilon_0 S (u)^2 / \delta^2$ , где  $\delta$  — длина зазора между обкладками;  $S$  — площадь обкладок;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость воздуха;  $u = U_0 + U_m \sin \omega t$  — приложенное напряжение.

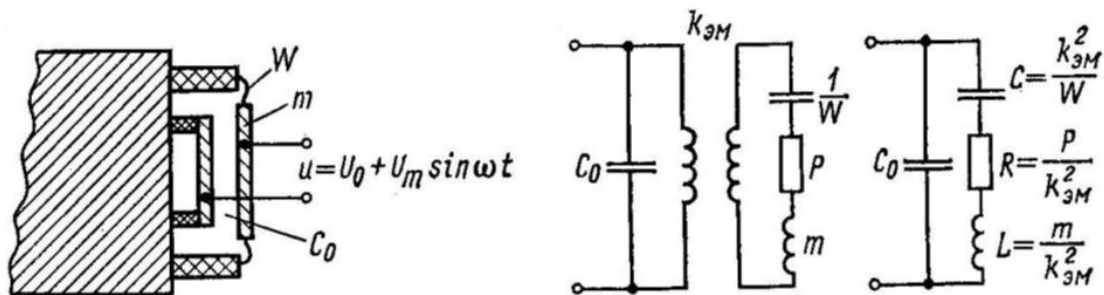


Рис.10.7. Поляризованный электростатический преобразователь и его эквивалентные схемы

Составляющая силы, имеющая частоту  $\omega$ , определяется как  $F_{эс}=(\varepsilon_0 S/\delta)\cdot(U_0/\delta)\cdot U_m \sin \omega t$ , и коэффициент электромеханической связи  $k_{эм}=(\varepsilon_0 S/\delta)\cdot(U_0/\delta)=C_0 E$ , где  $C_0$  — емкость преобразователя;  $E$  — напряженность постоянного электростатического поля между пластинами.

### 10.5. Пример расчета и варианты заданий

**Пример 10.5.1.** Составить эквивалентную схему преобразователя, изображенного на рис.10.6, и определить параметры этой схемы, если сечение магнитопровода и якоря  $a \times b = 10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$ ; длина якоря  $c = 60 \text{ мм}$ ; начальный зазор  $\delta_0 = 1,5 \text{ мм}$ ; изменение зазора  $\Delta \delta = 0,3 \text{ мм}$ ; ток в катушке  $i = I_0 + I_m \sin \omega t = 0,04 + 0,04 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$ ; количество витков  $w = 17000$ ; средняя длина витка  $l_{cp} = 0,1 \text{ м}$ ; диаметр голого провода  $d_0 = 0,2 \text{ мм}$ ; измерительное усилие  $F_{изм} = 50 \text{ Н}$ .

Определяем массу якоря (плотность стали  $\rho = 7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ):

$$m = a \cdot b \cdot c \cdot \rho = (10 \cdot 10 \cdot 60) \cdot 10^{-3} \cdot 7,7 \cdot 10^3 = 0,0462 \text{ кг.}$$

Жесткость подвеса:  $W = F_{изм} / \Delta \delta = 50 / (0,3 \cdot 10^{-3}) = 1,667 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ .

Суммарная проводимость зазоров (два одинаковых зазора):

$$G_\delta = 2 \mu_0 \cdot a \cdot b / \delta_0 = 2 \cdot 4\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} / 1,5 \cdot 10^{-3} = 167,6 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Коэффициент электромагнитной связи:

$$k_{эм} = G_\delta (I_0 w) / \delta_0 = 167,6 \cdot 10^{-9} \cdot 0,04 \cdot 17000 / 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,291 \cdot 10^3 \text{ Н/А.}$$

Составляющая силы, имеющая частоту  $\omega$ :  $F_{эм} \sim k_{эм} \cdot I_m \sin \omega t$ .

Действующее значение электромагнитной силы с частотой  $\omega$ :

$$F_{эм} = k_{эм} \cdot I_m / \sqrt{2} = 1,291 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{2} = 51,65 \text{ Н.}$$

Смещение якоря под действием силы  $F_{эм}$ :

$$\Delta x = F_{эм} / W = 51,65 / 1,667 \cdot 10^5 = 3,009 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Площадь для расчета успокоения:  $S = a \cdot c = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Успокоение (коэффициент вязкости воздуха при  $20^\circ \text{C}$   $\eta = 18,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ):  $P \approx \eta S / \Delta x = 18,1 \cdot 6 \cdot 10^{-4} / 3,009 \cdot 10^{-4} = 35,04 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$ .

Активное сопротивление катушки (удельное сопротивление меди  $\rho_{cu} = 0,0174 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ):

$$R_0 = \rho_{cu} \cdot 4 \cdot l_{sr} \cdot w / \pi \cdot d_0^2 = 0,0174 \cdot 4 \cdot 0,1 \cdot 17000 / \pi \cdot 0,2^2 = 941,6 \text{ Ом.}$$

Индуктивность катушки:  $L_0 = G_\delta w^2 = 167,6 \cdot 10^{-9} \cdot 17000^2 = 48,42 \text{ Гн}$ .

Частота механического резонанса:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{W}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1,667}{0,0462}} = 302,3 \text{ Гц.}$$

Параметры замещения механической цепи:

$$R_I = k_{эм}^2 / P = (1,291 \cdot 10^3)^2 / 35,04 = 47,58 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$C_1 = m / k_{эм}^2 = 0,0462 / (1,291 \cdot 10^3)^2 = 27,71 \cdot 10^{-9} \text{ Ф};$$

$$L_1 = k_{эм}^2 / W = (1,291 \cdot 10^3)^2 / 1,667 \cdot 10^5 = 10,004 \text{ Гн}.$$

Рассчитанные параметры соответствуют эквивалентной схеме рис.10.5.

Средствами программного пакета Micro-Cap 9 была составлена схема моделирования преобразователя (рис.10.8).

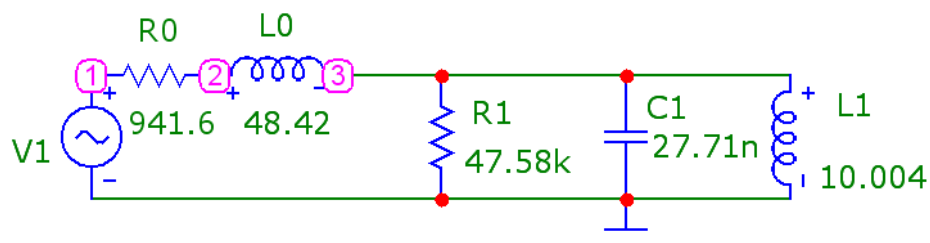


Рис.10.8. Схема моделирования преобразователя

В ходе моделирования получена частотная характеристика  $Z_{\Sigma} = \varphi(f)$ , приведенная на рис.10.9, на которой наблюдается характерный резонансный пик от влияния механической части преобразователя.

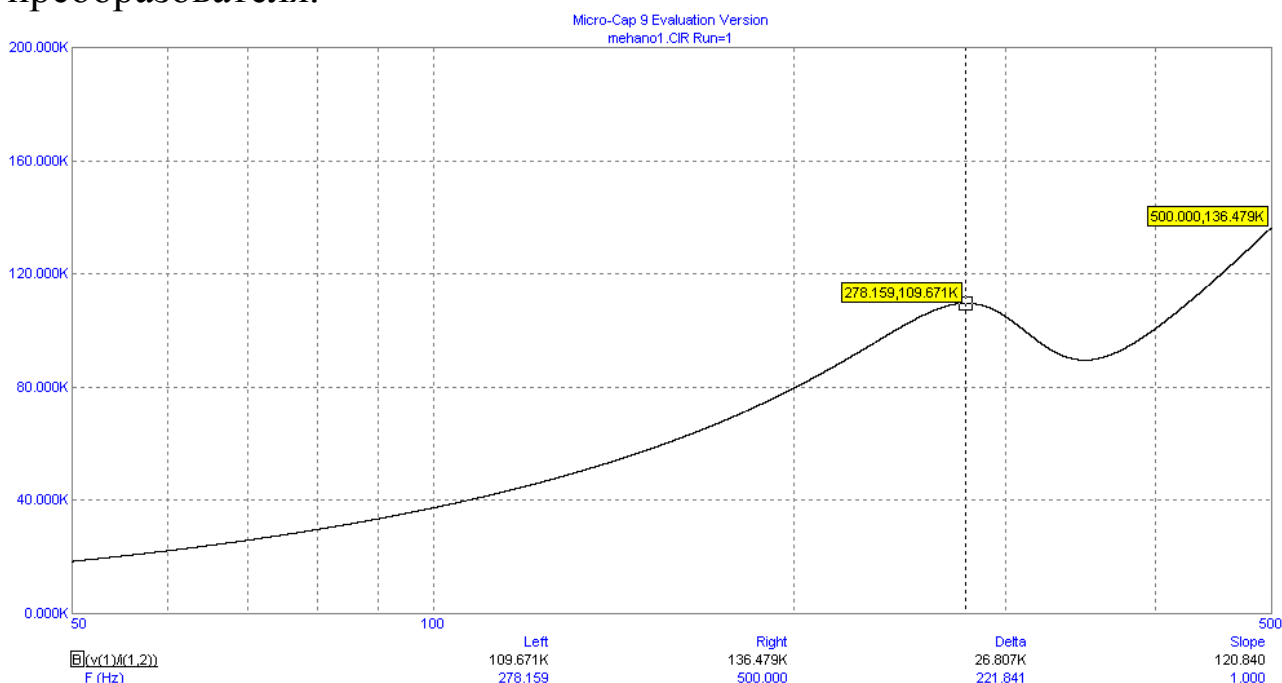


Рис.10.8. Результаты моделирования: частотная характеристика  $Z_{\Sigma} = \varphi(f)$

В качестве вариантов заданий студентам предлагается рассчитать свой вариант по курсовой работе для одной половины дифференциального преобразователя [1].

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1 – Варианты заданий к п.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$U_{II}, В$	10	10	10	15	15	15	15	20	20	20	20	25	25
$L_M, мм$	40	50	20	20	25	30	10	15	15	20	40	45	40
$b, мм$	2	2	1,5	1,5	1,5	2	1,5	2	2	1,5	2	2	2
$R_0, Ом$	200	300	400	1000	200	300	350	300	100	150	300	500	300
$j, А/мм^2$	3	3	3	2	2	2,5	2,5	2,5	2	2	3	3	3,5
$R_{H_2}, Ом$	250	450	1000	2000	300	400	350	400	300	300	400	550	400
материал	Манганин, $\rho=0,46 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$							Константан, $\rho=0,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$					
№	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$U_{II}, В$	25	30	30	30	30	35	35	35	40	35	15	40	45
$L_M, мм$	40	40	50	60	40	40	50	60	50	60	60	40	100
$b, мм$	2	2	3	3,5	2	2	3	2,5	3	3,5	3,5	3	3
$R_0, Ом$	400	300	500	600	400	300	700	700	600	350	300	500	1500
$j, А/мм^2$	3	3	3	2	2	2,5	3	3	2	2	2,5	3	3
$R_{H_2}, Ом$	500	350	600	650	800	400	800	850	700	400	350	600	2000
материал	Нихром, $\rho=1,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$							Реотан, $\rho=0,3 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$					

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 1 – Варианты заданий к п.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
$m_x$	кг	15	10	8	12	10	15	20	12	8	10	15	10	8
$h/b$	мм	4/ 20	3/ 20	3,5/ 30	4/ 25	3/ 20	4/ 20	5/ 20	2/ 30	4/ 25	3/ 20	4/ 20	3,5/ 30	2/ 20
$C_T, Н/мм^2$		$\sigma_{доп}=10; E=2,1\cdot 10^{-5}$				$\sigma_{доп}=15; E=2,2\cdot 10^{-5}$				$\sigma_{доп}=30; E=2,2\cdot 10^{-5}$				
Тензорезистор		2ПКП-5-50				2ФКП А-10-200х (г)				2ФКГК-15-100				
№		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$m_x$	кг	15	10	12	8	20	20	25	23	15	18	25	30	35
$h/b$	мм	4/ 40	3/ 30	3,5/ 20	3/ 20	4/ 40	4/ 20	3/ 20	5/ 40	4/ 40	4/ 40	4/ 50	5/ 40	5/ 45
$C_T, Н/мм^2$		$\sigma_{доп}=50; E=2,4\cdot 10^{-5}$				$\sigma_{доп}=100; E=2,4\cdot 10^{-5}$				$\sigma_{доп}=150; E=2,4\cdot 10^{-5}$				
Тензорезистор		2ФКП А-10-200х (г)				2ПКП-5-50				2ФКГК-15-400				

*Примечание. Расшифровка обозначений тензорезисторов: П- проволочная решетка; К- константан; Б- бумажная основа, П- пленочная; 20...- база, 100...- начальное сопротивление  $R_0$ ,  $x(z)$  - температурный режим наклепки, Ф- фольговая конструкция решетки; а- прямоугольные решетки. Допустимый ток в пределах 15-80 мА.*

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 1 – Варианты заданий к п.3

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$\theta_x', \theta_x$	°С	100	200	300	400	500	200	400	500	600	700
$\theta_{xc}$	°С	20	10	15	20	30	5	10	15	20	25
термопара		МК (медь-копель)					ЖК (железо-копель)				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1500	1500
5	10	20	30	30	100	70	60	100	100	150	100
ХК (хромель-копель)			ХА (хромель-алюмель)				ПП (платинородий-платина)				

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица 1 – Варианты заданий к п.4

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x, мм	4	5	4	5	6	8	10	10	8	10	4	5	4	5	6
y, мм	8	10	10	8	10	5	4	5	6	8	4	5	4	5	6
z, мм	4	5	4	5	6	4	5	4	5	6	8	10	10	8	10
F, Н	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Материал	Кварц														
	Титанат бария (правильно расположить электроды относительно осей)														

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица 1 – Варианты заданий к п.5.1

№	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	20
$\delta_m$ , мм	0,5	0,5	1,0	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	1,0	2,0	3,0	4

Таблица 2 – Варианты заданий к п.5.2 и п.5.3

№	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	0,1	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>	70	70	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50
$\delta$ , мм	25	25	30	25	20	10	30	5	10	15	20	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

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Таблица 1 – Варианты заданий к п.6.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$l$ , мм	1,6	6	1,5	4	8	2	6	12	3,2	1,8	6	6	6
$b$ , мм	0,8	3	0,75	2	4	1	3	6	1,6	0,9	3	3	3
$d$ , мм	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,15	0,2
$a$ , мм	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,15	0,2
$R_{хл}$ , $10^{-3}$ $м^3/(А·с)$	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06	5,2	6,4	5	1,6	1,8	5,8	20
$I_{ном}$ , мА	100	160	120	180	210	100	13	20	6	25	10	13	6
$B$ , Тл	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$S_B$ , В/Тл	0,06	0,09	0,07	0,1	0,12	0,04	0,45	0,8	0,2	0,25	0,12	0,5	0,6

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучеров В.А. Физические основы получения информации: учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы / Юж.- Рос. гос. политехн. ун-т.- Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016.- 32 с.

2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи).-Л: Энергоатомиздат, 1985г. - 320 с.

3. Шишмарев В.Ю. Физические основы получения информации: учеб. пособие/ М.: Академия, 2011. - 448 с.

4. Применение алгоритма натурно-модельных испытаний для диагностики электротехнических систем. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Кучеров В.А., Наугольнов О.А.Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-2. С. 98.

5. Метод натурно-модельного эксперимента в диагностике электромагнитов. Кучеров В.А., Клименко О.Д., Менькин В.А. В сборнике: Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики Материалы 16-ой Международной научно-практической конференции. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. 2015. С. 34-36.

6. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Широков К.М.Устройство для измерения магнитных параметров изделий из листовой электротехнической стали на базе технологий National Instruments//Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 11 (713). С. 43-45.

7. Шайхутдинов Д.В., Стеценко И.А., Леухин Р.И., Горбатенко Н.И., Дубров В.И., Широков К.М.Реализация прибора для измерения магнитных свойств электротехнических сталей на базе планшетного персонального компьютера//Актуальные вопросы науки. 2014. № XVI. С. 98-101

8. Gorbatenko N., Grechikhin V., Kolomiets A., Kucherova A., Narakidze N.Characterisation of Ni-Mn-Ga magnetic parameters based on indirect measurements and mathematical modeling of the experimental setup//Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2011 2011. С. 12-14.

9. Aleksanyan G.K., Gorbatenko N.I., Tarasov A.D.Development of hardware-software complex for electrical impedance tomography of

- biological objects//Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т. 9. № 12. С. 1030-1033
10. Aleksanyan G.K., Gorbatenko N.I., Tarasov A.D. Modern trends in development of electrical impedance tomography in medicine//Biosciences Biotechnology Research Asia. 2014. Т. 11. С. 85-91.
11. Боровой В.В., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В. Измерительный преобразователь магнитного потока для устройств экспресс-контроля магнитных характеристик листовой электротехнической стали//Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 11 (713). С. 39-43.
12. Ланкин А.М., Ланкин М.В., Гречихин В.В., Шайхутдинов Д.В. Определение гистерезисных магнитных характеристик методом решения обратной задачи гармонического баланса//Фундаментальные исследования. 2015. № 8-2. С. 303-306.
13. Ланкин М.В., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В., Саввин Д.Д., Ланкина Г.В., Ткаченко Е.Г. Цифровое устройство для измерения напряженности магнитного поля//патент на изобретение RUS 2149418. 2000
14. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Гречихин В.В. Измерители тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности ферромагнитных образцов//Состояние и проблемы измерений Тезисы докладов 6-ой Всероссийской научно-технической конференции. 1999. С. 176.
15. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Малашенко А.Г., Гречихин В.В. Устройство для испытания изделий из ферромагнитных материалов//патент на изобретение RUS 1465849. - 1989
16. Ланкин М.В., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В. Система управления регистрацией статических характеристик магнитотвердых материалов//патент на изобретение RUS 2130634. 1999.
17. Гришин А.С., Ланкин М.В. Математические модели изменения магнитных свойств//Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-2000 2000. С. 149-151.
18. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Вольт П.С. Устройство измерения напряженности магнитного поля земли// Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики.. 2001. С. 4-9.
19. Наракидзе А.Д., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д. Измеритель напряженности магнитного поля постоянных магнитов "тиммаг-4"//Научно-техническое творчество студентов вузов материалы

Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов вузов "Эврика-2005". 2005. С. 265-269.

20. Лозин О.И., Ланкин М.В., Хамизов Р.Р. Прибор для диагностики магнитных бурь// Научно-техническое творчество студентов вузов материалы Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов вузов "Эврика-2005". 2005. С. 295-300.

21. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В. Метод натурно-модельных испытаний при построении мехатронных устройств контроля качества ферромагнитных материалов (ФММ)// Мехатроника научно-методические и информационные материалы Всероссийской научной школы для молодежи в области мехатроники, 20-24 сентября 2010 г., г. Новочеркасск. М-во образования и науки РФ, Южно-Российский гос. технический ун-т (Новочеркасский политехнический ин-т). Новочеркасск, 2010. С. 3-7.

22. Ланкин М.В., Дубров В.И., Краевский И.С. Определение условий работы феррозондовой системы измерения координат подвижного объекта/ моделирование// Моделирование. Теория, методы и средства 2011. С. 38-43.

23. Гречихин В.В., Ланкин М.В., Ланкин А.М. Диагностика электромагнитов по вебер-амперной характеристике рабочего цикла// Пром-Инжиниринг труды международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). 2015. С. 235-238.

24. Боровой В.В., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В., Ланкин М.В., Шайхутдинов Д.В. Система экспресс-контроля магнитных характеристик листовой электротехнической стали// XX Международная конференция по постоянным магнитам 2015. С. 154-155.

25. Гречихин В.В., Ланкин М.В. Вычислительные средства в приборостроении// Методические указания к выполнению курсового проекта / Новочеркасск, 2016

26. Боровой В.В., Шайхутдинов Д.В., Ланкин М.В. Первичный измерительный преобразователь магнитного потока устройства экспресс-контроля изделий из листовой электротехнической стали// Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы Сборник тезисов и статей всероссийской научной школы. 2011. С. 37-41.