

НАУКА И ТЕХНИКА

УДК 531.8

Ф.Ш. Агаева

ЁМКОСТНЫЙ ДАТЧИК БОЛЬШИХ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Для измерения больших линейных перемещений используются различные типы датчиков. Автор предлагает схему датчика, который обладает надежной конструкцией и служит для измерения больших линейных перемещений. Ёмкостный датчик представляет собой 4 плоскопараллельных конденсатора, соединенных между собой последовательно, 5 резисторов с одинаковыми сопротивлениями, подключенными между этими конденсаторами, сердечника, перемещающегося между неподвижными параллельными пластинами конденсатора, и напряжения переменного тока. Выходные аналитические формулы датчика анализируются с применением программы MathCad и определяются характеристики датчика.

Ключевые слова: датчик; ёмкость; конденсатор; сопротивление; линейные перемещения датчика; расширение пределов измерения.

Various types of sensors are used for measuring big linear displacement. We suggest a sensor having a reliable construction and serving for measuring big linear displacement. A capacitive sensor is made of four plane-parallel condensers with series connection, five resistors having the same resistance level connected to the condensers in question, a core moving between the stationary parallel condenser plates and alternating voltage. The output analytical formulas of the sensor are analyzed using MathCad and the sensor features are determined.

Keywords: sensor; capacitance; condenser; resistance; sensor linear displacement; expansion of measurement limits.

Ёмкостные датчики представляют собой электрические конденсаторы, емкости которых меняются вследствие изменения под действием измеряемой величины площадей перекрытия обкладок S , расстояний между обкладками δ или диэлектрической проницаемости среды ϵ , находящейся между обкладками:

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{\delta} \quad (1)$$

Характеристика датчика, т.е. зависимость $C = f(\delta)$ является нелинейной. Датчики используются для измерения малых линейных перемещений (менее 1 мм) [1]. Целью данной статьи является решение вопроса о расширении пределов измерения линейных перемещений датчика (рис.1).

На рис. 1 представлены ёмкостные датчики в количестве n , соединенные между собой последовательно, резисторы с одинаковыми сопротивлениями, подключенные между этими преобразователями, свободные концы которых сведены в одной точке, дополнительный резистор, подключенный параллельно к цепи, состоящей из последнего резистора и конденсатора и относящейся к ёмкостным датчикам больших линейных перемещений. Внутри неподвижных электродов

ёмкостных преобразователей, под действием измеряемых линейных перемещений, выполняется движение цилиндрического стекляннo-го сердечника, у которого наружный диаметр меньше по величине Δ внутреннего диаметра полуцилиндрических неподвижных электродов конденсатора.

Применяя метод контурных токов в цепи, создаваемых конденсатором с двумя резисторами ($R_1R_2C_1, R_2R_3C_2, R_3R_4C_3, R_4R_5C_4$), можно составить систему уравнений напряжения в таком виде:

$$\begin{aligned} I_I(R_1 + R_2) - I_{II}R_2 &= U_{10}; \\ -I_I R_2 + I_{II}(R_2 + R_3) - I_{III}R_3 &= U_{20}; \\ -I_{II}R_3 + I_{III}(R_3 + R_4) - I_{IV}R_4 &= U_{30}; \\ -I_{III}R_4 + I_{IV}(R_4 + R_5) &= U_{40}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для упрощения выражения (2) принимаем $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$, при этом

$$\begin{aligned} 2RI_I - RI_{II} &= U_{10}; \\ -RI_I + 2RI_{II} - RI_{III} &= U_{20}; \\ -RI_{II} + 2RI_{III} - RI_{IV} &= U_{30}; \\ -RI_{III} + 2RI_{IV} &= U_{40}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $I_I, I_{II}, I_{III}, I_{IV}$ – контурные токи, $U_{10}, U_{20}, U_{30}, U_{40}$ – напряжения между обкладками конден-

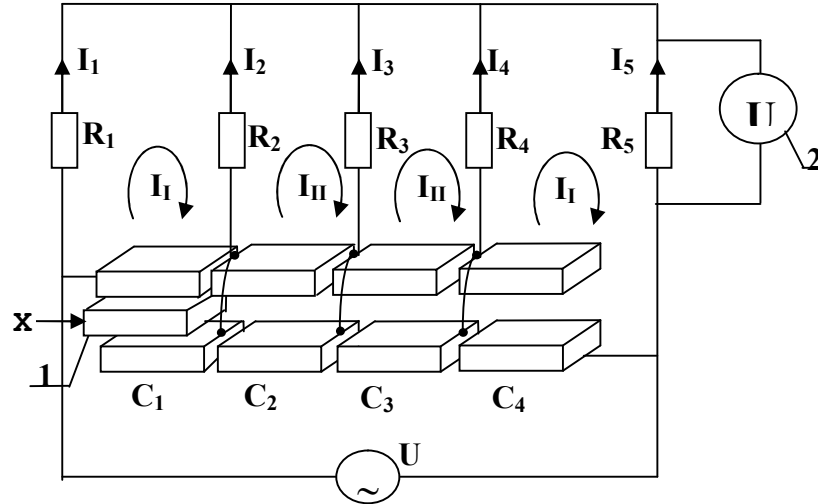


Рис. 1. Схема расширения пределов измерения линейных перемещений датчика

сатора без наличия сердечника.

Решая методом замещения уравнение (3), определяется ток I_{IV} контура IV:

$$I_5 = I_{IV} = \frac{1}{5R} (U_{10} + 2U_{20} + 3U_{30} + 4U_{40}). \quad (4)$$

Токи в ветвях определяются с помощью контурных токов, найденных в уравнении (3).

Падение напряжения на конденсаторах создающихся контурных токов не учитывается при составлении системы уравнений. Учитывается, что падение напряжения уменьшается на величину ΔU .

В системе уравнений (3) определяются контурные токи $I_I, I_{II}, I_{III}, I_{IV}$ и рассчитывается выходное напряжение, которое состоит из активных и реактивных составляющих.

Из системных уравнений (3) и (4) находится контурный ток I_{III} :

$$I_{III} = \frac{1}{R} (2RI_{IV} - U_{40}) = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{5R} (U_{10} + 2U_{20} + 3U_{30} + 4U_{40}) 2R - U_{40} \right] = \frac{1}{R} \left[\frac{2}{5} U_{10} + \frac{4}{5} U_{20} + \frac{6}{5} U_{30} + \frac{8}{5} U_{40} - U_{40} \right] = \frac{1}{5R} [2U_{10} + 4U_{20} + 6U_{30} + 3U_{40}] \quad (5)$$

Так же из уравнения (3) находятся I_{II} и I_I контурные токи:

$$I_{II} = \frac{1}{R} [2RI_{III} - RI_{IV} - U_{30}] = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{5R} (2U_{10} + 4U_{20} + 6U_{30} + 3U_{40}) 2R - \frac{1}{5R} (U_{10} + 2U_{20} + 3U_{30} + 4U_{40}) R - U_{30} \right] = \frac{1}{5R} [3U_{10} + 6U_{20} + 4U_{30} + 2U_{40}]$$

$$I_I = \frac{1}{R} [2RI_{II} - RI_{III} - U_{20}] = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{5R} (3U_{10} + 6U_{20} + 4U_{30} + 2U_{40}) 2R - \frac{1}{5R} (2U_{10} + 4U_{20} + 6U_{30} + 3U_{40}) R - U_{20} \right] = \frac{1}{5R} (4U_{10} + 3U_{20} + 2U_{30} + U_{40}). \quad (7)$$

Используя полученные формулы, находится падение напряжения U_1 в конденсаторе C_1 :

$$U_{C1} = I_1 j \cdot X_{C1}.$$

Воздействием x линейного перемещения сердечник получает определенное место между обкладками конденсатора. В таком случае ёмкость конденсатора:

$$C_1 = \left(\frac{\epsilon_0 b x}{0.2 \delta_0} + \frac{\epsilon_0 (a-x)b}{\delta_0} \right),$$

где a – длина обкладок конденсатора, b – его ширина. Если сопротивление конденсатора

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{2\pi f \left(\frac{\epsilon_0 (a-x)b}{\delta_0} + \frac{\epsilon_0 b x}{0.2 \delta_0} \right)},$$

тогда

$$U_1 = \frac{1}{5R} (4U_{10} + 3U_{20} + 2U_{30} + U_{40}) \cdot j \frac{1}{2\pi f \left(\frac{\epsilon_0 (a-x)b}{\delta_0} + \frac{\epsilon_0 b x}{0.2 \delta_0} \right)} = \frac{1}{5R} (4U_{10} + 3U_{20} + 2U_{30} + U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)}. \quad (8)$$

Так же рассчитывается падение напряжения в конденсаторах C_2, C_3 и C_4 :

$$U_2 = I_{II} j X_{C2} = \frac{1}{5R} (3U_{10} + 6U_{20} + 4U_{30} + 2U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \quad (9)$$

$$U_3 = I_{III} j X_{C3} = \frac{1}{5R} (2U_{10} + 4U_{20} + 6U_{30} + 3U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \quad (10)$$

$$U_4 = I_{IV} j X_{C4} = \frac{1}{5R} (U_{10} + 2U_{20} + 3U_{30} + 4U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \quad (11)$$

Выходное напряжение датчика выражается так:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{5} [(U_{10} - U_1) + 2(U_{20} - U_2) + 3(U_{30} - U_3) + 4(U_{40} - U_4)]. \quad (12)$$

Если значения напряжений U_1, U_2, U_3 и U_4 из выражений (8) ÷ (11) учитывать в уравнении (12), то:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{5} \left[\begin{aligned} & U_{10} - \frac{1}{5R} (4U_{10} + 3U_{20} + 2U_{30} + U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} + \\ & + 2 \left(U_{20} - \frac{1}{5R} (3U_{10} + 6U_{20} + 4U_{30} + 2U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \right) + \\ & + 3 \left(U_{30} - \frac{1}{5R} (2U_{10} + 4U_{20} + 6U_{30} + 3U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \right) + \\ & + 4 \left(U_{40} - \frac{1}{5R} (U_{10} + 2U_{20} + 3U_{30} + 4U_{40}) \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \right) \end{aligned} \right].$$

После упрощения выходное напряжение:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{5} \left[U_{10} + 2U_{20} + 3U_{30} + 4U_{40} - \frac{1}{5R} \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \times \right], \quad (13)$$

Из выражения (13) определяются активная и реактивная составляющие выходного напряжения:

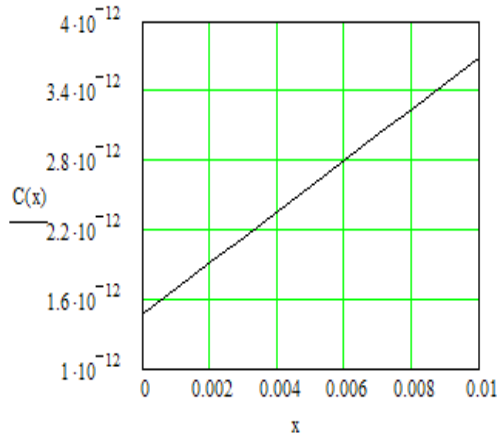
$$R_e U_{\text{вых}}(x) = \frac{1}{5} (U_{10} + 2U_{20} + 3U_{30} + 4U_{40});$$

$$I_m U_{\text{вых}}(x) = -\frac{1}{5} \left[\frac{1}{5R} \cdot j \frac{0.2 \delta_0}{2\pi f (\epsilon_0 (a-x)b \cdot 0.2 + \epsilon_0 b x)} \cdot (20U_{10} + 35U_{20} + 40U_{30} + 30U_{40}) \right].$$

$$f := 10^6 \quad U := 30 \quad R := 10^3 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$a := 10^{-2} \quad b := 10^{-2} \quad \delta_0 := 6 \cdot 10^{-4} \quad \varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12} \quad x := 0, 10^{-3} .. 10^{-2}$$

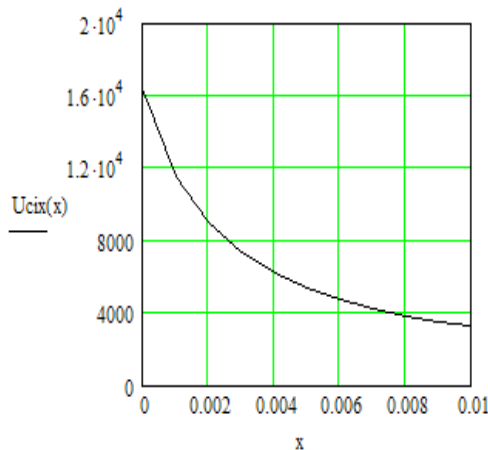
$$C(x) := \left(\frac{\varepsilon_0 \cdot b}{\delta_0} \right) \cdot (a + 1.5 \cdot x)$$



| x = | C(x) = |
|--------------------|-------------------------|
| 0 | 1.475·10 ⁻¹² |
| 1·10 ⁻³ | 1.696·10 ⁻¹² |
| 2·10 ⁻³ | 1.917·10 ⁻¹² |
| 3·10 ⁻³ | 2.139·10 ⁻¹² |
| 4·10 ⁻³ | 2.36·10 ⁻¹² |
| 5·10 ⁻³ | 2.581·10 ⁻¹² |
| 6·10 ⁻³ | 2.802·10 ⁻¹² |
| 7·10 ⁻³ | 3.024·10 ⁻¹² |
| 8·10 ⁻³ | 3.245·10 ⁻¹² |
| 9·10 ⁻³ | 3.466·10 ⁻¹² |
| 0.01 | 3.687·10 ⁻¹² |

$$\text{Re}U_{cix}(x) := \frac{(10U)}{5} \quad \text{Im}U_{cix}(x) := \frac{-125 \cdot \delta_0 \cdot U \cdot 0.2}{25 \cdot R \cdot \omega \cdot [0.2 \cdot \delta_0 \cdot (a - x) \cdot b + \varepsilon_0 \cdot b \cdot x]} \quad XC(x) := \frac{1}{\omega \cdot C(x)}$$

$$U_{cix}(x) := \sqrt{\text{Re}U_{cix}(x)^2 + \text{Im}U_{cix}(x)^2}$$



| U_cix(x) = | XC(x) = |
|-----------------------|-----------------------|
| 1.619·10 ⁴ | 1.079·10 ⁵ |
| 1.156·10 ⁴ | 9.383·10 ⁴ |
| 8.992·10 ³ | 8.3·10 ⁴ |
| 7.357·10 ³ | 7.441·10 ⁴ |
| 6.225·10 ³ | 6.744·10 ⁴ |
| 5.395·10 ³ | 6.166·10 ⁴ |
| 4.761·10 ³ | 5.679·10 ⁴ |
| 4.26·10 ³ | 5.263·10 ⁴ |
| 3.854·10 ³ | 4.905·10 ⁴ |
| 3.519·10 ³ | 4.592·10 ⁴ |
| 3.238·10 ³ | 4.316·10 ⁴ |

Рис. 2. Характеристики $U_{вых} = f(x)$, $C_{(x)} = f(x)$

Полное выражение выходного напряжения:

$$U_{вых}(x) = \sqrt{R_e U_{вых}(x)^2 + I_m U_{вых}(x)^2} \quad (14)$$

$$f = 10^6 \text{ Hz} ; U_{10} = U_{20} = U_{30} = U_{40} = 30 \text{ V} ;$$

$$R = 10^3 \text{ Ohm} ; a = b = 10^{-2} \text{ m} ;$$

$$\delta_0 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m} ; \varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} ;$$

$$x = (0 \div 10) \text{ sm}$$

Принимая вышеуказанные данные, используя MathCad программного пакета, из уравнения (14) получаем характеристики $U_{вых} = f(x)$, $C_{(x)} = f(x)$ (рис.2).

ЛИТЕРАТУРА

1 Фрайден Дж. Мир электроники / пер. с англ. Ю.А.Заболотной; под ред. Е.Л. Свинцова. М.: Техносфера, 2005. 588 с.