

новым элементом, определяющим магнитное сопротивление, является воздушный зазор.

Литература

1. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. - М.-Л.: Энергия, 1964, - 464 с.
2. Анго А. Математика для электро- и радиомехаников. - М.: Наука, 1967. - 780 с.

УДК 621.317.39:084.2

Н.П.Волков, Н.И.Даников, А.В.Космачев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛИНЕЙНОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ЧЕТНЫМ ЗАКОНОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ

В работотехнических комплексах, в системах автоматического управления для измерения линейных перемещений применяют емкостные преобразователи (ЕП), в частности, линейночастотные ЕП с изменяемой площадью взаимодействия подвижной и неподвижной пластин и четным законом изменения частоты измерительного LC-автогенератора, в колебательный контур (КК) которого включен ЕП.

Недостатком известных методик расчета ЕП [1-3] является невысокая точность воспроизведения заданной функциональной зависимости частоты LC-автогенератора на начальных участках перемещения подвижной пластины. В статье предлагается методика расчета линейночастотного ЕП с четным законом изменения частоты, позволяющая избежать указанного недостатка.

В работе рассматривается параллельное включение ЕП в КК LC-автогенератора [1]. Емкость ЕП

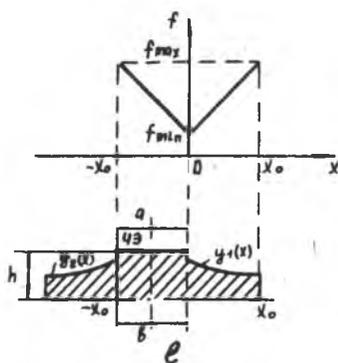
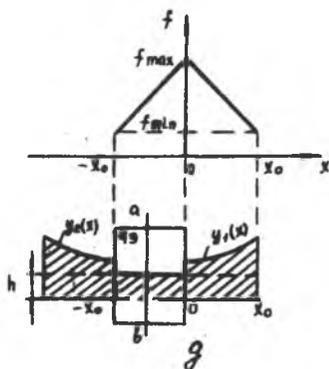
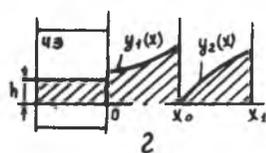
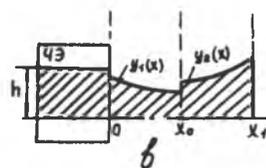
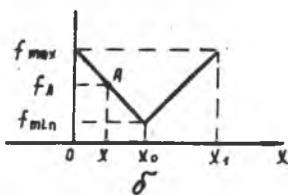
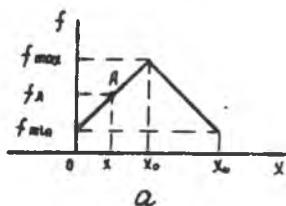
$$C_K = C + C_{K \min}, \quad (1)$$

где C - переменная часть емкости ЕП;

$C_{K \min}$ - паразитная емкость КК.

В силу требования четности закона изменения выходной частоты $f(x)$ LC-автогенератора (рис. 1, а, б) $x_0 = 0,5 x_1$, где $[0, x_0]$ -

интервал возрастания (убывания) $f(x)$, а $[x_0, x_1]$ - интервал убывания (возрастания) $f(x)$. Длина подвижного чувствительного элемента (ЧЭ) равна $l = x_0$.



Р и с. 1. Форма подвижной и неподвижной пластины универсального преобразователя

Зависимость изменения емкости КК от линейного перемещения ЧЭ ЕП $C_K = F(x)$, при которой выходная частота данного КК изменяется указанным на рис. 1, а образом, для $x \in [0, x_0]$ имеет вид

$$f(x) = f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{l} \cdot x, \quad (2)$$

где f_{\max} , f_{\min} , $f(x)$ - заданные максимальное, минимальное и текущее значения частоты КК;

X - текущее перемещение ЧЭ.

Частота LC-автогенератора определяется выражением

$$f(x) = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_K}}$$

Так как $f_{\max} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{K\min}}}$, то $f_{\max}/f(x) = \sqrt{C_K}/\sqrt{C_{K\min}}$, откуда емкость КК при определенном линейном перемещении равна

$$C_K = C_{K\min} \cdot f_{\max}^2 / f^2(x) \quad (3)$$

Решая совместно (2) и (3) и учитывая, что $f_{\max}/f_{\min} = P_f$ (P_f коэффициент перекрытия по частоте), находим

$$C_K = \frac{C_{K\min} A^2}{(B+X)^2}, \quad (4)$$

где $A = P_f X_0 / P_f - 1$; $B = A / P_f$.

Переменная часть емкости КК из (1)

$$C = C_{K\min} \left[\frac{A^2}{(B+X)^2} - 1 \right]. \quad (5)$$

Для $x \in]x_0, x_1]$ уравнения (2), (4) и (5) примут вид

$$f(x) = f_{\max} - \frac{f_{\max} - f_{\min}}{l} (x - x_0),$$

$$C_K = C_{K\min} \frac{A^2}{[A - (x - x_0)]^2}, \quad (6)$$

$$C = C_{K\min} \left[\frac{A^2}{[A - (x - x_0)]^2} - 1 \right]. \quad (7)$$

Аналогично, при четном законе изменения частоты КК вида, указанного на рис. 1, б, для $x \in [0, x_0]$:

$$C_K = C_{K\min} \frac{A^2}{(A-x)^2}; \quad (8)$$

$$C = C_{K\min} \left[\frac{A^2}{(A-x)^2} - 1 \right];$$

для $x \in]x_0, x_1]$;

$$C_K = C_{K\min} \frac{A^2}{(B + (x - x_0))^2};$$

$$C = C_{K\min} \left[\frac{A^2}{(B + (x - x_0))^2} - 1 \right]. \quad (9)$$

С целью улучшения линейности частотной характеристики ЕП, следует дополнить неподвижный элемент ЕП пластиной длиной $\ell = \chi_0$ и высотой h (см. рис. I, в, г). Пластина обеспечивает наличие некоторой дополнительной емкости $C_{доп}$. Если $C_{доп} \gg C_{клев} + C_{парал}$, то можно считать, что движение рабочей точки А: $f_A = f(x)$ (см. рис. I, а, б) по частотной характеристике ЕП будет определяться только емкостью $C_{доп}$ и изменением площади взаимного перекрытия подвижной и неподвижной пластин. Высота h определяется из условия обеспечения при $\chi = 0$ f_{max} (см. рис. I, а) или f_{min} (см. рис. I, б).

Рассмотрим конструкцию ЕП с ЧЭ прямоугольной формы, которая должна реализовать четный, относительно некоторого положения ЧЭ, закон изменения выходной частоты вида (см. рис. I, а) LC-автогенератора (см. рис. I, в). За начало координат возьмем правую грань ЧЭ. Определим высоту h пластины, обеспечивающей $C_{доп}$. Емкость плоского МП обусловлена площадью взаимного перекрытия подвижной и неподвижной пластин $S(x)$ и равна [2]

$$C = \frac{1,11 \epsilon (n-1)}{4\pi d} S(x) = z S(x), \quad n\Phi; \quad z = \frac{1,11 \epsilon (n-1)}{4\pi d}, \quad (10)$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость среды между пластинами ЕП;

n - число пластин ЕП;

$S(x)$ - площадь взаимного перекрытия пластин ЕП, см²;

d - расстояние между пластинами ЕП, см.

Из (3) $C_{k\max} = C_{k\min} P_f^2$. В точке $\chi = 0$ $S(0) = h\ell$. Решая систему

$$\begin{cases} C_{k\max} = C_{k\min} P_f^2; \\ C_k = z S(0); \\ S(0) = h\ell; \end{cases} \quad (11)$$

относительно h , получаем $h = \frac{P_f^2 C_{k\min}}{z\ell}$.

(12)

Для $\chi \in [0, \chi_0]$ система уравнений (II) примет вид

$$\begin{cases} C_k = C_k \min \frac{A^2}{(B+x)^2} ; \\ C_k = z S(x) ; \\ S(x) = (\ell - x) h + \int_0^x y_1(t) dt , \end{cases} \quad (I3)$$

где $y_1(t)$ - закон изменения отгибающей неподвижной пластины на $[0, x_0]$ $0 \leq t \leq x$.

$$\text{Из (I3)} \quad y_1(x) = \frac{C_k \min}{z} \left[\frac{P_f^2}{\ell} - \frac{2A^2}{(B+x)^3} \right]. \quad (I4)$$

Для $x \in]x_0, x_1]$ имеем систему вида

$$\begin{cases} C_k = C_k \min \frac{A^2}{(A - (x - x_0))^2} ; \\ C_k = z S(x) ; \\ S(x) = \int_{x-x_0}^{x_0} y_1(t) dt + \int_{x_0}^x y_2(t) dt , \end{cases} \quad (I5)$$

где $y_2(t)$ - закон изменения отгибающей неподвижной пластины на $]x_0, x_1]$.

$$\text{Из (I5)} \quad y_2(x) = \frac{C_k \min}{z} \left[\frac{P_f^2}{\ell} - \frac{2A^2}{(B + (x - x_0))^3} + \frac{2A^2}{(A - (x - x_0))^3} \right]. \quad (I6)$$

Отгибающие неподвижной пластины $y_1(x)$ и $y_2(x)$ - параметрические кривые, зависящие от параметра P_f . Рассматривая функцию $y_2(x)$ в точке $x = x_0$ видим, что уравнение (I6) имеет физический смысл при $P_f \lesssim 1,7$. Это максимально возможная для конструкций такого вида величина P_f (см. рис. I, в).

Проводя аналогичную процедуру для закона вида (см. рис. I, б), получим аналогично (II)

$$\begin{cases} C_k \min = z S(0) ; \\ S(0) = h \ell , \end{cases}$$

$$\text{откуда} \quad h = \frac{C_k \min}{z \ell} . \quad (I7)$$

Для $x \in [0, x_0]$ аналогично (I3)

$$\begin{cases} C_k = C_k \min \frac{A^2}{(A-x)^2} ; \\ C_k = z S(x) ; \end{cases}$$

$$S(x) = (\ell - x)h + \int_0^x y_1(t) dt,$$

$$\text{откуда } y_1(x) = \frac{C_k \min}{z} \left[\frac{1}{\ell} + \frac{2A^2}{(A-x)^3} \right]. \quad (18)$$

Для $x \in]x_0, x_1]$, аналогично (15)

$$C_k C_k^- = C_k \min \frac{A^2}{(x-x_0)^3};$$

$$C_k = z S(x);$$

$$S(x) = \int_{x-x_0}^{x_0} y_1(t) dt + \int_0^x y_2(t) dt,$$

$$\text{откуда } y_2(x) = \frac{C_k \min}{z} \left[\frac{1}{\ell} + \frac{2A^2 x_0}{(A-(x-x_0))^3} - \frac{2A^2}{(B+(x-x_0))^3} \right].$$

Рассмотрение кривой $y_2(x)$ в точке $x = x_0$ дает, что это уравнение имеет физический смысл при $P_f \lesssim 1,4$. Это максимально возможная для конструкции такого вида величина P_f (см. рис. 1, г)

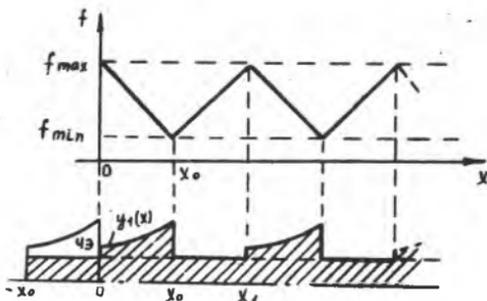
Следует отметить, что невозможно создание конструкций ЕП, реализующих законы изменения выходной частоты ЛС-автогенератора, указанные на рис. 1, а и 1, б на основе ЕП с неподвижной пластиной, состоящей из двух секций. Математическое решение уравнений, описывающих $y_1(x)$ и $y_2(x)$ для некоторых $x \in [0, x_1]$ приводит к отрицательной площади взаимного перекрытия подвижной и неподвижной пластин, что не имеет физического смысла.

Исходя из симметрии требуемых законов изменения выходной частоты ЛС-автогенератора относительно некоторого положения ЧЭ, можно предложить симметричную относительно оси ab конструкцию ЕП (см. рис. 1, д, е).

Для конструкции ЕП, реализующей закон изменения частоты вида (см. рис. 1, д), h определяется из (17), $y_1(x)$ - из (18). Закон изменения отгибающей $y_2(x)$ для $x \in [0, x_0]$ неподвижной пластины ЕП определяется из условия симметрии конструкции относительно оси ab .

Для конструкции, реализующей закон изменения частоты вида (см. рис. 1, е), h определяется из (12), $y_1(x)$ - из (14), $y_2(x)$ - из условия симметрии конструкции. Исследование $y_1(x)$ в точке $x = 0$ показывает, что уравнение (14) имеет физический смысл при $P_f \leq 3$.

С целью универсализации ЕП можно предположить конструкцию, не имеющую ограничений по P_f и реализующую четные законы изменения частоты ЛС-автогенератора, указанные на рис. 1, д, е, отказавшись от ЧЭ прямоугольной формы (рис. 2). Здесь h определя-



Р и с. 2. Формы зависимости частоты от перемещения и формы подвижной пластины в чувствительном элементе датчика

ется из (I7), $y_1(x)$ - из (I8), а последующие секции неподвижной пластины повторяют форму ее на $[-x_0, x_0]$, ЧЭ тождествен по площади форме неподвижной пластины на $[0, x_0]$.

Из приведенных выше расчетов следует, что предложенная конструкция ЕП реализует четный закон изменения выходной частоты LC -автогенератора любого из указанных на рис. I, д, е видов в зависимости от начального положения ЧЭ, не имея при том ограничений по P_f .

Предложенная методика расчета может быть применена для проектирования ЕП с произвольно заданной функциональной зависимостью $f(x)$.

Вопросы, связанные с процессом изготовления и сборки ЕП, подробно рассмотрены в [3].

Литература

1. Харинский А.Л. Основы конструирования элементов радиоаппаратуры. - Л.: Энергия, 1971.
2. Азарх С.Х. Конденсаторы переменной емкости. - М.: Энергия, 1965.
3. Ащюковский В.А. Емкостные преобразователи перемещения. - М.-Л.: Энергия, 1966.