

Н. М. Старобинский, О. П. Скобелев

ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ЕМКОСТНЫМ ВИНТОВЫМ ДАТЧИКОМ

В технике измерения больших перемещений широкое распространение получили дискретно-аналоговые устройства с пилообразным законом изменения фазы в функции пути [1], [2], [3], [4].

В таких устройствах в качестве первичных преобразователей используются индуктивные или емкостные датчики.

В работе [4] приводится описание датчика, в котором емкость образована проводящими винтовыми полосами на изоляционном материале статора и ротора. Известны также емкостные датчики с металлическим ротором по типу ходового винта и статором в виде гайки такого же шага [3].

В обеих конструкциях обеспечивается минимально возможный зазор.

Характерной особенностью датчиков является синусоидальная связь емкости с перемещением. От того, насколько точно выполнен синусоидальный закон распределения емкости, зависит линейность фазы в функции пути.

Описанные устройства нашли применение в системах следящего преобразования, где на метровых перемещениях они обеспечивают точность порядка нескольких микрон. Однако их использование в системах непосредственного отсчета, удобных для одновременного измерения параметров движения (путь, скорость, ускорение) затруднительно. Это связано с малым выходным напряжением датчиков, а также с необходимостью наличия специального комплекса усилительных и фазопреобразующих устройств, существенно усложняющих измерительную систему.

В системах непосредственного отсчета более целесообразно применение устройства с амплитудной пилообразной модуляцией выходного напряжения в функции пути [7].

В настоящей работе рассматривается принцип действия тако-

то устройства, элементы теории емкостного винтового датчика, результаты экспериментального исследования.

Пилообразная модуляция может быть получена на емкостном датчике, статорные пластины которого выполнены по типу многозаходного винта в виде проводящих полос (рис.1).

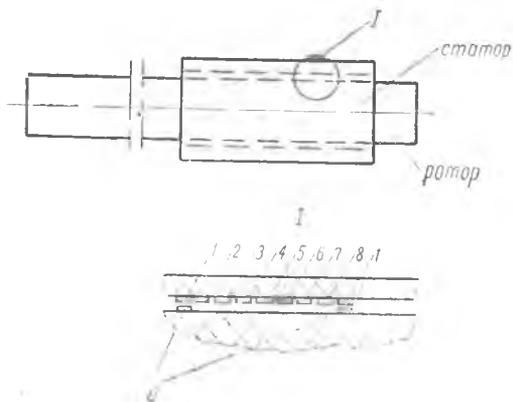


Рис. 1.

Ротор датчика однозаходный. При перемещении ротора с периодической закономерностью изменяются емкости $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0n}$. При определенном соотношении конструктивных параметров может быть получена линейная зависимость $u_{\text{вых}}(l)$ в пределах шага $p = \frac{h}{n}$ (Рис.2).

В результате, если пластины датчика последовательно переключаются при напряжении U_m , достигается линейная связь по всей длине рабочего хода, т. е. пилообразная модуляция вдоль пути.

Блок-схема устройства и временная диаграмма приведены на рис. 3.

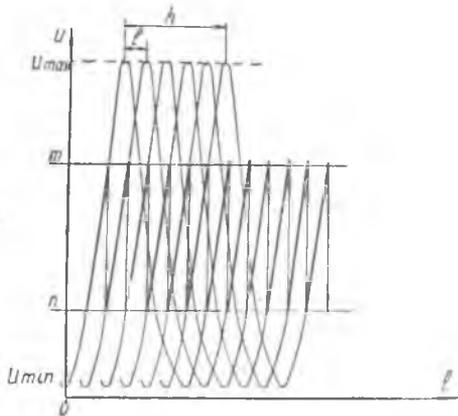


Рис. 2.

Емкости $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0n}$, включенные в измерительную схему, питаются напряжением звукового генератора ЗГ.

При перемещении ротора амплитуда напряжения датчика измеряется вольтметром ЛВ. При напряжении U_m срабатывает сравнивающее устройство СрУ, выходной импульс которого подается на счетное устройство СчУ, фиксирующее число интервалов. Одновременно коммутирующее устройство КУ отключает ключом K_1 емкость C_{01} и включает ключом K_2 емкость C_{02} .

Далее процесс измерения повторяется. Таким образом, перемещение ротора датчика определяется дискретным числом интервалов, фиксируемых счетным устройством, и аналоговой величиной выходного напряжения датчика, измеряемой вольтметром.

Основным элементом устройства, определяющим его возможности, является многозаходный емкостный датчик.

Это вызывает необходимость выяснения аналитической зависимости емкости в функции перемещения от основных конструктивных параметров датчика.

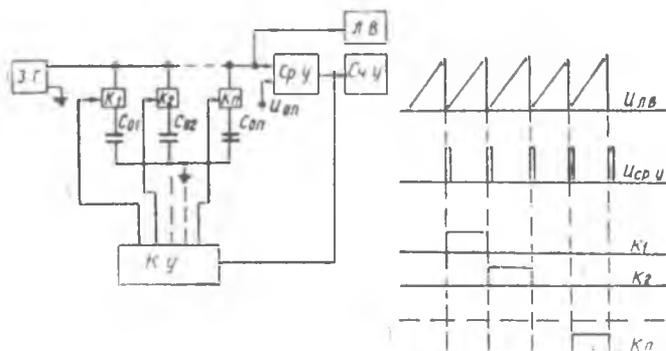


Рис. 3.

Задача сводится к определению потенциальной функции трехмерного электрического поля винтовой структуры.

Потенциал точки m (рис. 4), созданный равномерно распределенным по спирали зарядом с линейной плотностью τ —

$$V_m = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dl}{r}. \quad (1)$$

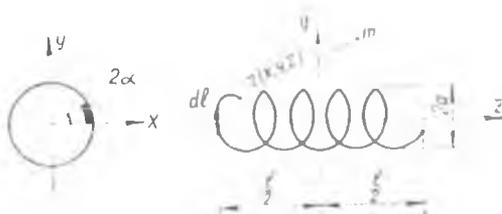


Рис. 4.

$$\begin{aligned} r^2 &= (z - z')^2 + \rho^2 + a^2 - 2a\rho\cos(\varphi - \varphi') \equiv \\ &\equiv r^2(a, \varphi', z', \rho, \varphi, z), \end{aligned} \quad (2)$$

где a, φ', z' — координаты точки на поверхности спирали;
 ρ, φ, z — те же, вне спирали,
 тогда

$$V_m(\rho, \varphi, z) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dl(a, \varphi', z')}{r(a, \varphi', z', \rho, \varphi, z)}. \quad (3)$$

После ряда преобразований, полагая спираль выполненной ленточным проводником шириной b с исчезающе малой толщиной, получим

$$V_m(\rho, \varphi, z) = -\frac{\tau}{\pi \epsilon_0} \operatorname{ctg} \psi \left\{ \sum_{\lambda=1}^n \frac{\sin \alpha \lambda}{\alpha \lambda} \sin \lambda \left(\varphi - \alpha - 2\pi \frac{z}{a} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[I_\lambda'(\lambda \cdot \operatorname{ctg} \psi) \cdot K\lambda \left(\lambda \frac{2\pi \rho}{h} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Здесь

h — шаг спирали;

ψ — угол намотки;

a — радиус спирали;

2α — угол, под которым из точки на спирали видно поперечное сечение ленты ($2\alpha \approx \frac{b}{2-a \sin \psi}$);

I_λ' — функция Бесселя для точки, принадлежащей поверхности спирали;

$K\lambda$ — полный эллиптический интеграл 1-го рода для точки вне спирали.

Функция (4) обладает весьма характерными особенностями, свойственными потенциальным функциям трехмерного поля винтовой структуры [5]:

1. Периодичность решения относительно величины λ ($\varphi = 2\pi \frac{z}{h}$).

2. Слияние пространственных переменных φ и z в одну переменную $\varphi \pm 2\pi \frac{z}{h}$.

3. Появление функций I_λ и $K\lambda$ с аргументом, содержащим λ в качестве параметра.

Разность потенциалов для двух спиралей одинакового шага с линейной плотностью заряда $+\tau$ и $-\tau$ без учета возможной неравномерности распределения у концов:

$$V_{12} = V_1 \left(\alpha, a_1, \frac{b}{2} \right) - V_2 \left(\alpha, a_2, z \right). \quad (5)$$

В случае $h \gg b$, считая $\varphi = 0$ для обеих спиралей и $z = 0$ для одной из спиралей, имеем:

$$V_{12} = -\frac{\tau}{\pi \epsilon_0} \operatorname{ctg} \psi \sum_{\lambda=1}^n \frac{\sin \alpha \lambda}{\alpha \lambda} \left[I_\lambda(u) K\lambda''(w) \cdot \sin \alpha \lambda \right. \\ \left. - I_\lambda''(w) K\lambda'(u) \cdot \sin \lambda \left(\alpha - 2\pi \frac{z}{h} \right) \right]. \quad (6)$$

$I_\lambda'(u)$, $K\lambda'(w)$ — функции точек на поверхности спирали a_1 ;
 $I_\lambda''(w)$, $K\lambda''(u)$ — то же, для спирали a_2 .

Взаимная емкость системы, варьируемая при перемещении ротора:

$$c_{12}(a_1, a_2, z) = \frac{2\tau l}{V_{12}}, \quad (7)$$

здесь l — длина подвижной спирали.

В некоторых частных случаях могут быть сделаны дальнейшие упрощения.

В случае

$$a_1 = a_2 = a_1, \quad z_1 = 0, \quad z_2 = z = \frac{h}{2}$$

$$\sin \lambda \left(\alpha - 2\pi \frac{z}{h} \right) = -\sin \alpha \lambda$$

и, следовательно,

$$V_{12} = -\frac{2\tau}{\pi \epsilon_0} \operatorname{ctg} \psi \sum_{\lambda=1}^n \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\alpha \lambda} [I\lambda'(\lambda \operatorname{ctg} \psi) K\lambda'(\lambda \operatorname{ctg} \psi)]. \quad (8)$$

Произведение $-I\lambda'(u) \cdot K\lambda'(u)$ при одинаковых аргументах может быть представлено в виде:

$$-I\lambda'(\lambda \operatorname{ctg} \psi) K\lambda'(\lambda \operatorname{ctg} \psi) \cong \frac{\sin \psi}{2\lambda \cos^2 \psi} \times \\ \times \left[1 - \frac{3 \sin^2 \psi}{8\lambda^2} \cdot \left(1 - \frac{10}{3} \sin^2 \psi + \frac{7}{3} \sin^4 \psi \right) \right]. \quad (9)$$

Для не слишком малых $\operatorname{ctg} \psi$, как это имеет место в большинстве практических случаев, поправочным множителем можно пренебречь. Тогда:

$$c_{12} = \frac{2\tau l}{V_{12}} \cong \frac{2\pi \epsilon_0 l \cos \psi}{\sum_{\lambda=1}^n \frac{1}{\lambda} \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\alpha \lambda}} = \frac{2\pi \epsilon_0 l \alpha \cos \psi}{\sum_{\lambda=1}^n \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\lambda}}. \quad (10)$$

Рассмотренный случай соответствует минимальной емкости системы. Максимальная емкость достигается при $z_1 = z_2 = 0$.

Разность потенциалов

$$V_{12} = -\frac{\tau}{\pi \epsilon_0} \operatorname{ctg} \psi \sum_{\lambda=1}^n \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\alpha \lambda} [I\lambda'(u) K\lambda''(\omega) - I\lambda''(\omega) K\lambda'(u)]. \quad (11)$$

Для $a_2 \ll a_1$, т. е. для $u \approx \omega$ можно положить

$$I\lambda'(u) K\lambda''(\omega) - I\lambda''(\omega) K\lambda'(u) \cong I\lambda'(u) K\lambda'(u) - I\lambda'(\omega) K\lambda''(\omega).$$

Пользуясь разложением (9) получим:

$$V_{12} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \operatorname{ctg} \psi \sum_{\lambda=1}^n \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\sin \psi_1}{\cos^2 \psi_1} - \frac{\sin \psi_2}{\cos^2 \psi_2} \right) \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\alpha \lambda}, \quad (12)$$

где

$$\psi = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}.$$

После дальнейших упрощений

$$V_{12} = \frac{\tau (\sin \psi_1 - \sin \psi_2)}{\pi \epsilon_0 \sin 2\psi} \sum_{\lambda=1}^n \frac{1}{\lambda} \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\alpha \lambda}$$

и

$$C_{12} = \frac{2\pi\epsilon_0 l \sin 2\psi}{(\sin \psi_1 - \sin \psi_2) \sum_{\lambda=1}^n \frac{1}{\lambda} \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\alpha \lambda}} = \frac{2\pi\epsilon_0 l \alpha \sin 2\psi}{(\sin \psi_1 - \sin \psi_2) \sum_{\lambda=1}^n \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\lambda^2}}. \quad (13)$$

Сумма $\sum_{\lambda=1}^n \frac{\sin^2 \alpha \lambda}{\lambda^2}$ выражения (10) и (13) представляет быстро затухающий пульсирующий ряд, частота пульсаций которого зависит от ширины ленты.

Этот ряд в знаменателе (10), (13) ослабляет влияние на результирующую емкость ширины ленты.

Винтовой многозаходный датчик (рис. 1) удобно рассматривать как разветвленную емкостную цепь. При включенной в измерительную схему пластине l частичные емкости C_{02} , C_{12} , C_{03} , C_{32} , C_{31} и т. д. оказывают на C_{01} шунтирующее действие.

Результирующая емкость

$$C_{01} = C_{01} + \frac{C_{02} \cdot C_{12}}{C_{02} + C_{12}} + \frac{C_{03} \left(C_{32} + \frac{C_{32} \cdot C_{21}}{C_{32} + C_{21}} \right)}{C_{03} + C_{32} + \frac{C_{32} \cdot C_{21}}{C_{32} + C_{21}}} + \dots \quad (14)$$

При включенной в цепь пластине 2:

$$C_{02}' = C_{02} + \frac{C_{01} \cdot C_{12}}{C_{01} + C_{12}} + \frac{C_{03} \cdot C_{03}}{C_{32} + C_{03}} + \dots \quad (15)$$

Емкости C_{01} , C_{12} , C_{03} , C_{13} ... определяются согласно выражению (6).

Очевидно, что соседние пластины уменьшают полезное изменение емкости на единицу длины.

При определении потенциальной функции поля ленточной спирали (4) в выражениях взаимной емкости системы (6), (10), (13), (14), (15) предполагалась однородная диэлектрическая среда с постоянной ϵ_0 .

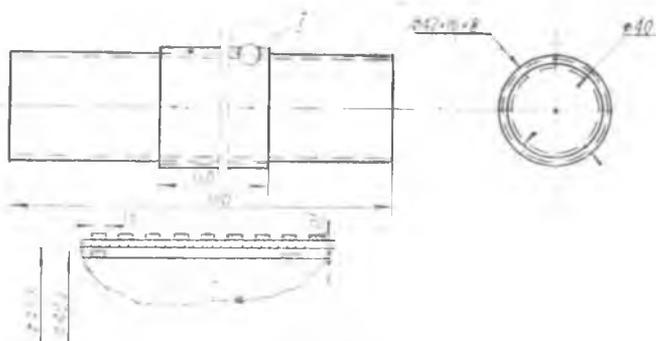


Рис. 5.

В реальной конструкции датчика (рис. 1), в варианте экспериментальной модели (рис. 5) диэлектрическая проницаемость материала основы существенно влияет на взаимную емкость системы. В результате емкость датчика (рис. 5), вычисленная согласно выражениям (10), (13), (14), (15), получается меньше действительной емкости.

Винтовые пластины экспериментальной модели (рис. 5) прорезаны в проводящем покрытии, предварительно нанесенном на ротор и статор датчика. Многозаходные пластины выполняются на наружной поверхности статора, что облегчает изготовление модели. Материал основы статора — бакелизированный текстолит, основы ротора — высокочастотный диэлектрик.

С целью повышения чувствительности и улучшения линейности выходного напряжения пластины датчика поочередно включались в схему последовательного резонанса (индуктивность l гн,

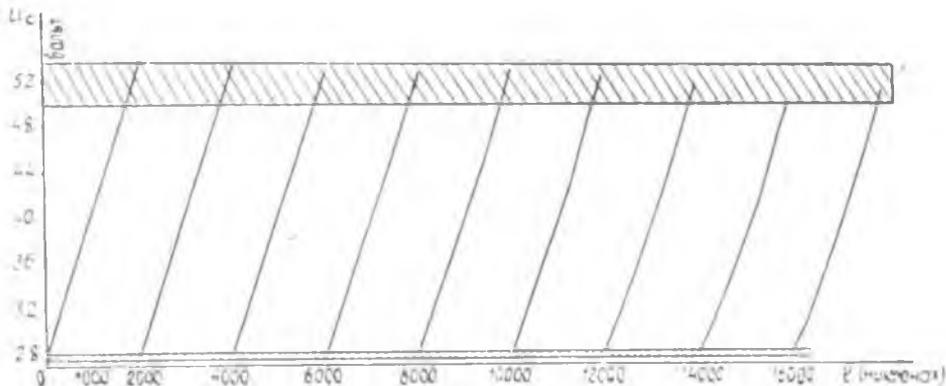


Рис. 6

напряжение питания 15 в, частота 25 кГц). Контроль перемещения производился механическим индикатором с точностью 1мк в специальной тарировочной стойке.

Результаты измерения показывают, что изменению емкости 12 пф/мм соответствует изменение напряжения 12 в/мм при нелинейности, не превышающей 1% (рис. 6).

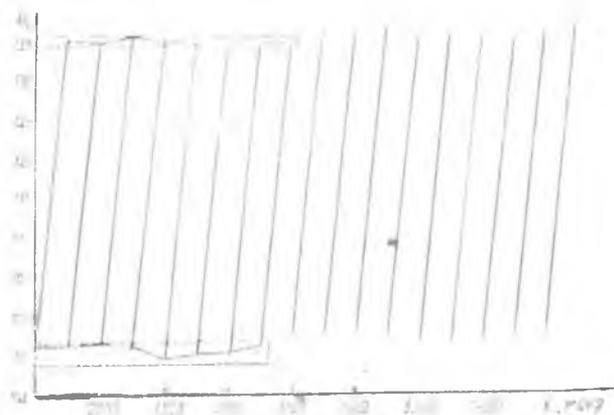


Рис. 7.

На рис. 7 приведены зависимости $U_{\text{вых}}(l)$, полученные на подобной модели датчика, с вдвое меньшим шагом. Изменению емкости 5 пф/мм соответствует изменение напряжения 30 в/мм при нелинейности не более 1% (параметры питания те же).

В связи с низкой механической точностью выполнения пластин датчиков выходные напряжения в конце каждого цикла не совпадают. Величина разброса составляет 4—10% от перепада напряжений в пределах цикла и может быть значительно уменьшена при изготовлении датчика на прецизионном оборудовании.

Блок-схема (рис. 3) проверена на макете. В схеме последовательного резонанса включается датчик рис. 5. В качестве ЗГ, ЛВ, СрУ использовались приборы ЗГ-12М, АЧМ2 Пс-10000. В качестве СрУ применялась диодная схема сравнения с положительной обратной связью [6]. Напряжение на схему сравнения подается через катодный повторитель без последующего выпрямления.

Коммутатор КУ состоит из кольцевого триггерного счетчика, собранного на транзисторах и дешифратора на диодах, обеспечивающего поочередное срабатывание выходных реле, коммутирующих цепи $C_{01} - C_{08}$. Применение бесконтактных электронных ключей повышает динамические возможности и надежность схемы.

ВЫВОДЫ

1. В работе изложен принцип действия устройства с пилообразной амплитудной модуляцией в функции пути. Применение

многозаходного винтового емкостного датчика в сочетании с резонансной измерительной схемой обеспечивает высокую чувствительность устройства и хорошую линейность выходного напряжения.

Точность устройства определяется, в первую очередь, технологией выполнения винтовых пластин датчика и, следовательно, возможностями станочного оборудования.

Рекомендуется использование устройства в системах непосредственного отсчета для измерения параметров движения.

2. Получены аналитические выражения для взаимной емкости ленточных спиралей в функции перемещения с учетом их основных конструктивных параметров, которые могут быть использованы при проектировании и исследовании винтовых емкостных датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. T i n d e n. N. I., H o r l o c k B. A. The Inductosin and its application, „The Journal of British Institution of Radio Engineers“ 1957 v. 17 № 7

2. Булгаков А. А. Программное управление металлорежущими станками, Госэнергоиздат, 1959.

3. Применение линейных датчиков положения в системах управления металлорежущими станками, в сборнике «Автоматизация в машиностроении за рубежом», И. Л., 1959.

4. M u n a l l D. I., A new idea for precision linear positioning, „Control Engng“. 1959, 6, № 6, p. 125—127.

5. Г. Бухгольц. Расчет электрических и магнитных полей. ИЛ, 1961.

6. Я. Миллман и Г. Тауб, Импульсные и цифровые устройства, Госэнергоиздат, 1960.

7. О. П. Скобелев, Н. М. Старобинский, Измеритель больших перемещений. Бюллетень изобретений и товарных знаков, № 8, 1963