

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С НЕПОДВИЖНЫМИ КОМПЛАНАРНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

А.В. ПЕТРОВ

(Ивановская государственная текстильная академия)

Цель настоящей работы заключалась в исследовании бесконтактного электростатического датчика, применяемого для контроля нарушения свойств текстильного продукта. Рассмотрим картину силовых линий, характеризующую поле в рабочем зазоре датчика и методику для расчета количественной оценки изменений параметров датчика.

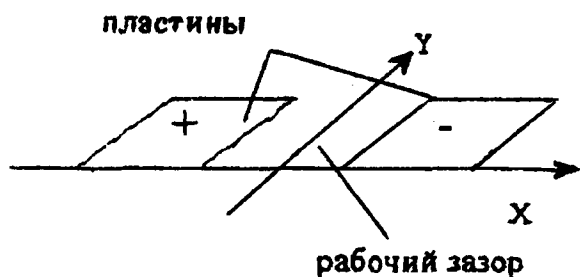


Рис. 1

Свойства электростатических датчиков определяет поле в рабочем зазоре между положительным и отрицательным электродами. Нас интересует поле бесконтактного датчика с компланарно расположенными пластинами, где происходит перемещение контролируемого материала в направлении оси  $Y$  (рис. 1).

Предлагаемый датчик разработан с целью повышения помехоустойчивости, достигаемой за счет расположения рабочих зазоров параллельно основным нитям. В этом случае значительно изменить емкость датчика способна лишь часть мелких пороков ткани, что соответственно уменьшает вероятность ложных срабатываний.

Поскольку в данном случае пластины датчика расположены в одной плоскости, рассматриваемое поле является криволинейным и имеет сложную форму. Геометрические размеры датчика в направлении

оси  $Y$  во много раз больше величины расстояния между электродами. Поэтому поле можно считать плоскопараллельным.

Расчет поля такого датчика можно получить с помощью конформных отображений [1], являющихся практическим применением теории функций комплексного переменного для двумерных электростатических полей и позволяющим установить связь между искомым и равномерным полями.

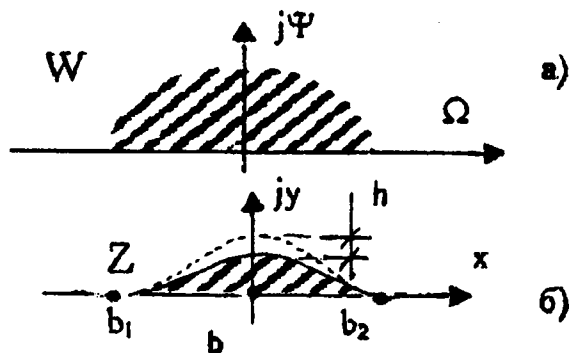


Рис. 2

При расчете электростатического датчика полагаем, что ширина пластин значительно больше ширины рабочего зазора, то есть поле в каждом рабочем зазоре можно рассчитывать отдельно. После принятых ограничений проекция силовых линий поля на вертикальную плоскость примет вид полуокружности (рис. 2-а). Для построения картины поля найдем сначала функцию, реализующую отображение верхней полуплоскости  $W$  на верхнюю полуплоскость  $Z$ , из которой выброшена малая площадка, ограниченная отрезком и дугой кривой, опирающейся на этот отрезок и касающейся действительной оси в его концах (рис. 2-б).

Воспользуемся для этого формулой [1, с.192]:

$$Z = W - \frac{h}{a^2} (\sqrt{(W - b_1)^3 (W - b_2)^3} - (W - b_1)(W - b_2)(W - b)),$$

где  $a$  – половина расстояния между пластинами;  $b_1 = b - a$ ,  $b_2 = b + a$ ;  $h$  – малая высшего порядка относительно  $a$ .

Поместим точку  $b$  в начало координат. Тогда

$$Z = W - \frac{h}{a^2} (\sqrt{(W + a)^3 (W - a)^3} - (W + a)(W - a)(W)).$$

Упростим это выражение:

$$Z = W - \frac{h(W^2 - a^2)}{a^2} (\sqrt{(W^2 - a^2)} - W).$$

После подстановки  $W = \Omega + j\psi$  и преобразования получим

$$Z = \Omega + K_1 (F_1 + \Omega) + K_2 (F_2 - \psi) + j[\psi + K_2 (F_1 + \Omega) + K_1 (F_2 - \psi)]. \quad (1)$$

Здесь

$$K_1 = \frac{h\Omega^2 + h\psi^2}{a^2},$$

$$K_2 = \frac{2\Omega h\psi}{a^2},$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{(\Omega^2 - \psi^2 - a^2)^2 + (2\Omega\psi)^2} + \Omega^2 - \psi^2 - a^2}{2}},$$

$$F_2 = \sqrt{\frac{\sqrt{(\Omega^2 - \psi^2 - a^2)^2 + (2\Omega\psi)^2} - 2\Omega\psi}{2}}.$$

Заменяем в выражении (1)

$$x = \Omega + K_1 (F_1 + \Omega) + K_2 (F_2 - \psi),$$

$$y = \psi + K_2 (F_1 + \Omega) + K_1 (F_2 - \psi)$$

и перейдем к относительным единицам, разделив действительную и мнимую части на  $a$ :

$$Z = \frac{x}{a} + j \frac{y}{a}. \quad (2)$$

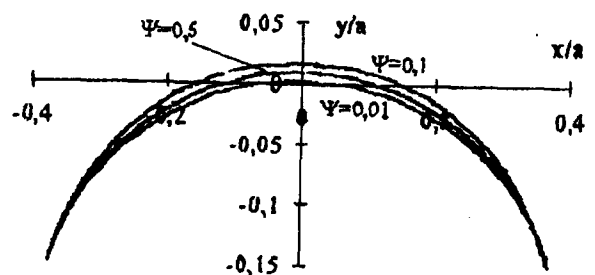


Рис. 3

На рис.3 показана картина поля, рассчитанная по формуле (2). Коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  введены для упрощения записи.

Теперь получим формулу для количественной оценки изменений параметров

датчика, вызываемых прохождением и ткани.

Электрические свойства электростатических датчиков определяются напряжением  $U$  между электродами, зарядом  $q$  и энергией  $W$  взаимодействия между полем конденсатора и внешнего диэлектрика [2, с. 72]:

$$\partial W = -\frac{U^2}{2} \partial C. \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда обкладки конденсатора не подключены к цепи источника тока. Конденсатор в этом случае является электрически изолированной системой. Здесь изменение энергии, накопленной в системе конденсатор–диэлектрик, вызывает изменение напряжения между электродами и емкости конденсатора, а общий заряд остается величиной постоянной, перетекая с одной обкладки конденсатора на другую.

Энергия взаимодействия диполя с внешним полем согласно [2, с. 63]:

$$W = -pE, \quad (4)$$

где  $p$  – момент диполя, Дж·Кл/Н;  $E$  – напряженность поля, Н/Кл.

Математическую модель контролируемого материала можно представить, как и ранее [3], в виде эллиптического диполя с моментом  $p$ :

$$p = 4\pi abc \epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} E, \quad (5)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – размеры осей эллипсоида, м;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость контролируемого материала.

Напряженность электростатического поля конденсатора при расстоянии  $d$  между пластинами

$$E = \frac{U}{d}. \quad (6)$$

После подстановки (5) и (6) в (4) получим выражение для энергии поля:

$$W = -8\pi abc \epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \frac{U^2}{d^2}.$$

Изменение энергии взаимодействия между датчиком и материалом происходит за счет изменения параметров электрического диполя. Наибольшее влияние оказывают изменение объема и диэлектрической проницаемости диполя. Значительное изменение диэлектрической проницаемости диполя наблюдается при контроле клеевых швов, а изменение объема диполя может быть вызвано изменением высоты  $b$  контролируемого материала.

Итак, наряду с вышесказанным изменение энергии взаимодействия между датчиком и тканью определяем как функцию двух переменных:

$$\partial W = -8\pi abc \epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \frac{U^2}{d^2} \partial \epsilon \partial b. \quad (7)$$

После подстановки (7) в (3) и упрощения запишем

$$\partial C = \left( \frac{8\pi abc \epsilon_0}{d^2} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \partial \epsilon \right) \right) \partial b.$$

Определим пределы интегрирования. Так как при правильном сшивании кусков ткани и оверлочным швом, и швом внакладку диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{ш}$  шва больше диэлектрической проницаемости  $\epsilon_T$  ткани, то верхним пределом интегрирования по  $\partial \epsilon$  будет диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{ш}$  шва. Высота  $b_{ш}$  шва больше высоты  $b_T$  ткани на величину, равную двум диаметрам нитей, используемых для сшивания, соответственно верхним пределом интегрирования по  $\partial b$  высота шва  $b_{ш}$ :

$$\partial C = \frac{8\pi abc \epsilon_0}{d^2} \left( \int_{b_n}^{b_{ш}} \left( \int_{\epsilon_T}^{\epsilon_{ш}} \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \partial \epsilon \right) \partial b \right). \quad (8)$$

Изменение емкости найдем с помощью интегрирования выражения (8). С учетом

конструктивных особенностей расположения пластин ( $c=d$ ) получим

$$\Delta C = \frac{8\pi a \epsilon_0}{d} (b_m - b_r) (\epsilon_m - \epsilon_r - 3 \ln \frac{\epsilon_m + 2}{\epsilon_r + 2}). \quad (9)$$

Для практических расчетов выражение (9) можно упростить:

$$\Delta C = \frac{0,222a}{d} (b_m - b_r) (\epsilon_m - \epsilon_r - 3 \ln \frac{\epsilon_m + 2}{\epsilon_r + 2}), \text{ пФ},$$

здесь все размеры в мм.

В конечном результате представим относительное изменение емкости. За начальную емкость примем емкость  $C_0$  датчика, заправленного тканью с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ :

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{8\pi a}{\epsilon_r S} (b_m - b_r) (\epsilon_m - \epsilon_r - 3 \ln \frac{\epsilon_m + 2}{\epsilon_r + 2}),$$

Если датчик имеет диэлектрическую прокладку между поверхностью пластин и тканью, то начальная емкость датчика  $C_0$ :

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{b_r}{\epsilon_r} + \frac{\delta_n}{\epsilon_n}},$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{8\pi a}{dS} \left( \frac{b_r}{\epsilon_r} + \frac{\delta_n}{\epsilon_n} \right) (b_m - b_r) (\epsilon_m - \epsilon_r - 3 \ln \frac{\epsilon_m + 2}{\epsilon_r + 2}),$$

Напряжение  $U$  на пластинах датчика в момент прохождения шва можно вычислить по формуле

$$U = \frac{U_0}{\frac{\Delta C}{C_0} + 1}, \quad (10)$$

где  $U_0$  – напряжение на пластинах датчика, заправленного тканью без шва в рабочей зоне.

Далее приведены результаты экспериментальных исследований. При проведении эксперимента использовали ткань камвольную костюмную с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 1,49$ ; толщиной

здесь все размеры в мм. начальную емкость примем емкость  $C_0$  датчика, заправленного тканью с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ :

где  $b_r$  – толщина ткани, м;  $\delta_n$  – толщина диэлектрической прокладки, м;  $\epsilon_n$  – диэлектрическая проницаемость материала прокладки:

$b_r = 1$  мм; шов шириной  $a = 3$  мм, высотой  $b = 1,1$  мм.

Датчик состоит из 6 пластин размерами  $15 \times 10$  мм с рабочими зазорами  $d = 2$  мм, расположенными параллельно направлению движения ткани, и представляет собой пять параллельно соединенных изолированных конденсаторов.

Измерялась разность потенциалов между пластинами, представляющими собой положительные и отрицательные электроды (рис.1). Изменение напряжения фиксировалось самописцем НЗ38-8П.

В среде Microsoft Excel моделировали изменение напряжения на пластинах. Для получения шума задавали случайное (по равномерному закону) изменение диэлектрической проницаемости и толщины тка-

ни. Шов моделировали посредством изменения диэлектрической проницаемости на величину  $\Delta\epsilon_{\text{ш}} = 0,001$  и высоты шва,  $\Delta b_{\text{ш}} = 0,1\text{мм}$ . Относительную разность напряжений рассчитывали по формуле

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{1}{\frac{\Delta C}{C_0} + 1} - 1.$$



Рис. 4

На рис.4 представлена форма сигнала при последовательном прохождении трех швов: график расчетной зависимости  $\frac{\Delta U}{U_0}(t)$  – на рис.4-а; экспериментальная характеристика, зафиксированная с помощью самописца НЗ38-8П – на рис.4-б. Из рисунка видно, что экспериментальная характеристика соответствует расчетной за

исключением того, что экспериментальное значение величины напряжения ниже расчетного, поскольку при расчете не учитывали влияния нагрузки. Эксперимент показывает, что действующая в системе помеха наряду с белым шумом имеет вид синусоидального сигнала определенной частоты, зависящей от скорости движения ткани и порождаемой колебаниями экспериментальной установки.

## ВЫВОДЫ

Получена методика расчета параметров электростатического датчика с компланарными пластинами и рабочими зазорами, расположенными параллельно направлению перемещения ткани, которая может быть использована для инженерных расчетов таких датчиков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Наука, 1973.
2. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. – М.: Наука, 1989.
3. *Расторгуев А.К.* //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – № 6. С. 71...74. 1986.

Рекомендована кафедрой автоматизации и радиоэлектроники. Поступила 06.12.01.