

УДК 677.05-791

**МОДЕЛЬ КОНДЕНСАТОРА
С ВОЛОКНИСТЫМ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ**

**MODEL OF A CONDENSER
WITH FIBROUS HUMIDITY CONTENT DIELECTRIC**

П.В. БУЙЛОВ, Н.А. КОРОБОВ
P.V. BUJLOV, N.A. KOROBOV

(Ивановская государственная текстильная академия)
(Ivanovo State Textile Academy)
E-mail: ttp@igta.ru

Получена математическая модель емкостного датчика с волокнистым влагосодержащим диэлектриком.

The mathematical model of the electric-capacity gauge with fibrous humidity content dielectric is received.

Ключевые слова: емкостный метод измерения, линейная плотность, неровнота полуфабриката (ленты, ровницы, нити), конденсатор с волокнистым диэлектриком, степень влажности материала.

Keywords: an electric-capacity method of measurement, a linear density, unevenness of a semi-manufactured article (a band, a roving, a thread), a condenser with fibrous dielectric, a wetness degree of a material.

Емкостный метод измерения в текстильной промышленности широко используется для оценки неровноты полуфабрикатов (ленты, ровницы, нити) по линейной плотности. Данный метод измерения относится к косвенным методам, в которых измеряется величина, функционально связанная с требуемым параметром. Любому косвенному методу измерения присущи не только инструментальные, но и методические погрешности. Поэтому, для получения более достоверных результатов измерения необходимо построение

адекватной математической модели, описывающей зависимость выходного сигнала первичного преобразователя от контролируемого параметра, с учетом наиболее значимых факторов, влияющих на результат измерения.

В работах, посвященных расчету основных уравнений емкостных преобразователей [1], [2], не учитывается влияния сорбированной исследуемым продуктом влаги на результат измерения.

Для определения емкости конденсатора с волокнистым диэлектриком, содержа-

щим влагу, представим его в виде трехслойной модели, в которой первый слой состоит из обезвоженного однородного материала, второй слой состоит из воды, а оставшаяся часть заполнена воздухом. Таким образом, получаем три конденсатора, соединенных параллельно. Эквивалентная емкость такого конденсатора определяется по формуле:

$$C = C_{\text{воз}} + C_{\text{в}} + C_{\text{вол}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{воз}}$ – емкость конденсатора с воздушным диэлектриком; $C_{\text{в}}$ – емкость конденсатора с водным диэлектриком; $C_{\text{вол}}$ – емкость конденсатора с однородным твердым диэлектриком (волокном).

Емкость конденсатора:

$$C_{\text{воз}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 H L}{d}, \quad (2)$$

где H – высота пластин; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая постоянная; L – ширина пластин; d – расстояние между пластинами.

В данной модели воздух из конденсатора вытесняется волокном и влагой. Исходя из этого высоту конденсатора, заполненного воздухом, можно выразить через общую высоту обкладок конденсатора H :

$$H_{\text{воз}} = H - H_{\text{в}} - H_{\text{вол}}, \quad (3)$$

где $H_{\text{воз}}$ – высота воздушного слоя; $H_{\text{в}}$ – высота слоя воды; $H_{\text{вол}}$ – высота слоя волокна.

Выразив объем через геометрические размеры прямоугольного параллелепипеда и через массу заключенного в этом объеме вещества, найдем высоту слоя:

$$H_{\text{сл}} = \frac{m}{\rho L d}, \quad (4)$$

где ρ – объемная плотность вещества (волокна или воды).

Тогда емкость конденсатора, заполненного волокнистым влагосодержащим диэлектриком:

$$C = \frac{H L \varepsilon_0}{d} + \frac{m_{\text{в}} \varepsilon_0}{\rho_{\text{в}} d^2} (\varepsilon_{\text{в}} - 1) + \frac{m_{\text{вол}} \varepsilon_0}{\rho_{\text{вол}} d^2} (\varepsilon_{\text{вол}} - 1), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{воз}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_{\text{воз}} \approx 1$; $\varepsilon_{\text{вол}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость волокна; $\varepsilon_{\text{в}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость воды; $m_{\text{вол}}$ – масса волокна; $m_{\text{в}}$ – масса воды; $\rho_{\text{вол}}$ – плотность волокна; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды.

Формулу (5) можно представить в виде:

$$C = C_0 + \Delta C, \quad (6)$$

где C_0 – емкость конденсатора, заполненного воздухом:

$$C_0 = \frac{H L \varepsilon_0}{d}; \quad (7)$$

ΔC – изменение емкости, вызванное наличием в нем волокнистого влагосодержащего диэлектрика:

$$\Delta C = \frac{m_{\text{в}} \varepsilon_0}{\rho_{\text{в}} d^2} (\varepsilon_{\text{в}} - 1) + \frac{m_{\text{вол}} \varepsilon_0}{\rho_{\text{вол}} d^2} (\varepsilon_{\text{вол}} - 1). \quad (8)$$

Величина полезного сигнала датчика зависит не только от массы волокна, находящегося между пластинами, но и от его диэлектрической проницаемости, а также от массы и диэлектрической проницаемости воды. Известно, что диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon_{\text{в}}$ зависит от частоты, на которой производится измерение, поэтому в (8) правильнее писать $\varepsilon_{\text{в}}(f)$, где f – частота. Однако при проектировании измерительных датчиков емкостного типа, для нужд текстильной промышленности, данный факт не учитывают. Зависимость диэлектрической проницаемости воды от частоты описывается диаграммой Коул – Коула [3]:

$$\varepsilon^* - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (9)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость воды при нулевой частоте (на постоянном токе); ε_∞ – диэлектрическая проницаемость воды на бесконечно большой частоте (оптическая диэлектрическая проницаемость); τ – время релаксации, равно времени, в течение которого, после снятия внешнего поля, поляризация молекул воды уменьшается в $1/e$ раз; α – эмпирическая постоянная, описывающая расширение релаксационной области.

По экспериментальным данным [4] значение $\varepsilon_0 = 81$, а $\varepsilon_\infty = 5,5$. Значение постоянной α зависит от формы связи воды и находится в пределах $0 < \alpha < 1$. Имеются экспериментальные подтверждения диаграммы (9), полученные в [5], которые хорошо согласуются с расчетными значениями (рис.1 – частотная зависимость действительной части комплексной диэлектрической проницаемости адсорбированной воды. Цифрами от 1 до 9 обозначены кривые зависимостей $\varepsilon'(f)$ для различных значений относительного давления пара p/ps , где p – парциальное давление пара; ps – равновесное давление насыщенного пара. Кривые соответствуют следующим фиксированным значениям p/ps : 1 – ($p/ps = 0,001$); 2 – ($p/ps = 0,55$); 3 – ($p/ps = 0,6$); 4 – ($p/ps = 0,65$); 5 – ($p/ps = 0,7$); 6 – ($p/ps = 0,75$); 7 – ($p/ps = 0,8$); 8 – ($p/ps = 0,85$); 9 – ($p/ps = 0,98$).

Дополнительный эксперимент, проведенный авторами, показал, что из семейства кривых, представленных на рис.1, для волокнистого влагосодержащего диэлектрика, с относительной влажностью $w = 5\%$, ближе всех подходит кривая 5.

Весовой и емкостный методы измерения линейной плотности ленты несут информацию не только о массе волокна, но и о массе сорбированной волокном воды. При измерении весовым методом величина влажностной составляющей прямо пропорциональна влажности волокна и составляет несколько процентов (рис. 2-а).

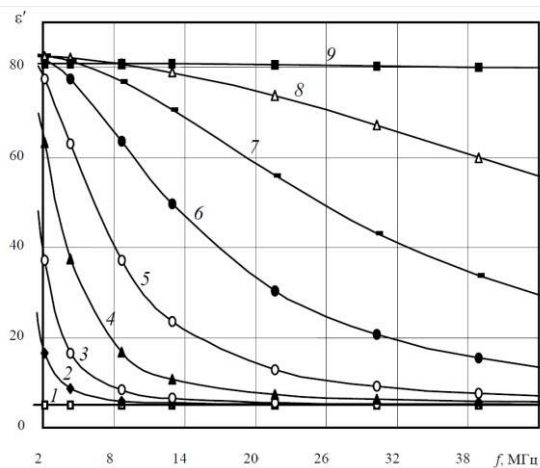


Рис. 1

На рис. 2 представлена структура сигнала при весовом и емкостном методе измерения линейной плотности. На диаграмме: а – относительная доля сигнала датчика, вызванная наличием воды в продукте, при влажности продукта $w=5\%$; б – относительная доля сигнала датчика, обусловленная сухим диэлектриком (волокном), при влажности продукта $w=5\%$.

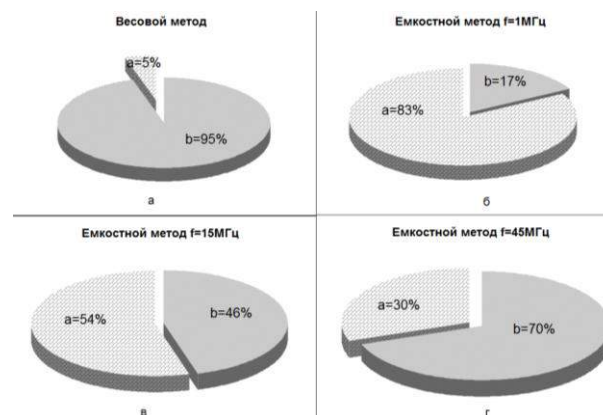


Рис. 2

Если мы поместим этот же волокнистый продукт в емкостный датчик, то получим сигнал ΔC . Подставив в формулу (8) значения плотности и диэлектрической проницаемости волокна (например, хлопка): $\varepsilon_{\text{вол}} = 2,2$; $\rho_{\text{вол}} = 1,5 \text{ г/см}^3$ и воды $\rho_{\text{в}} = 0,998 \text{ г/см}^3$, можно оценить степень влияния влажности волокна на результат измерения плотности ленты емкостным методом (рис. 2 диаграммы б, в, г). При расче-

тах значения диэлектрической проницаемости воды брались из [5] для относительного давления пара $p/p_s = 0,7$ и равными $\varepsilon=80$ для частоты $f = 1\text{МГц}$, $\varepsilon = 20$ для $f = 15\text{МГц}$, $\varepsilon = 8$ для $f = 45\text{МГц}$ (кривая 5 на рис. 1). Сравнение приведенных диаграмм показывает, что емкостный метод измерения намного более чувствителен к влажности материала, чем весовой, поэтому при проектировании емкостных измерительных преобразователей необходимо особое внимание уделять способам компенсации влияния ваги на результат измерения. Влияние влажности уменьшается с увеличением рабочей частоты датчика, однако даже при $f \rightarrow \infty$ ($\varepsilon_b = 5,5$) емкостный метод примерно в 2 раза чувствительней к влажности материала, чем весовой.

ВЫВОДЫ

1. Получена математическая модель емкостного датчика с волокнистым влагосодержащим диэлектриком (формула (5)).

2. Из полученной модели видно, что емкостный метод измерения линейной плотности ленты намного более чувствителен к влажности материала, чем весовой.

3. Степень влияния влажности материала на результат измерения зависит от рабочей частоты датчика. При увеличении частоты влияние влаги снижается, но никогда не достигает значения, соответствующего весовому методу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рассторгуев А.К.* Основные уравнения электростатических и электромагнитных датчиков // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1986, №6. С.72.
2. *Каминский Д.М., Тарабаев В.И.* О диэлектрической проницаемости волокнистой массы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1973, №4. С.72.
3. *Берлинер М.А.* Измерение влажности. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973.
4. *Grant E. H. et al.* Dielectric behaviour of water at microwave frequencies // J. Chem. Phys. – №1, 1957.
5. *Симаков И.Г., Гомбоев Р.И.* Исследование диэлектрической релаксации воды в граничной фазе // Сб. тр. по мат. IX конференции молодых ученых: Байкальская школа по фундаментальной физике. – Иркутск, 2006. С. 232...235.

Рекомендована кафедрой прикладной математики и информационных технологий. Поступила 29.03.11.