

УДК 621.317.3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСКОЗНОГО ВОЛОКНА

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF VISCOSE FIBER

О.Н. КРЮТЧЕНКО, Д.А. МОРОЗОВ, М.В. ЧИРКИН

O.N. KRYUTCHENKO, D.A. MOROZOV, M.V. CHIRKIN

(Рязанский государственный радиотехнический университет)

(Ryazan State Radio Engineering University)

E-mail: moroz7124@vandex.ru; chirk.mikhail@vandex.ru.

Разработана конструкция экспериментального макета и проведены исследования электрофизических свойств вискозного волокна в диапазоне частот до 10 МГц.

Показано, что при влажности волокна, не превышающей 11%, регистрация действительной части диэлектрической проницаемости волокна позволяет реализовать абсолютный метод определения его влажности.

При влажности волокна в диапазоне 3...15% содержание воды в волокне может быть определено на основании измерения действующего значения силы тока, протекающего через пробу волокна на частотах 20...50 кГц.

The construction of experimental layout is worked out and studies of electrophysics properties of viscose fibre in the frequency range to 10 MHz.

It is shown that when the fiber moisture content not exceeding 11%, the registration of the valid part of dielectric permeability of the fiber allows absolute method to determine its humidity.

At a relative humidity of fiber in the range of 3...15% water content in the fiber can be determined based on the measurement of the current value of the current flowing through the sample fiber at frequencies of 20...50 kHz.

Ключевые слова: влажность вискозного волокна, действительная и мнимая часть диэлектрической проницаемости, проводимость.

Keywords: viscose fiber moisture, real and imaginary part of dielectric constant, conductivity.

Для изучения электрофизических свойств вязкого волокна [1...3] использован макет, представляющий собой разборный параллелепипед объемом $a \times b \times c = 0,0025 \text{ м}^3$ (рис. 1 – модель экспериментального макета), изготовленный из листовой стали. На внутренних боковых стенках макета располагался стеклотекстолит с проводящими электродами.

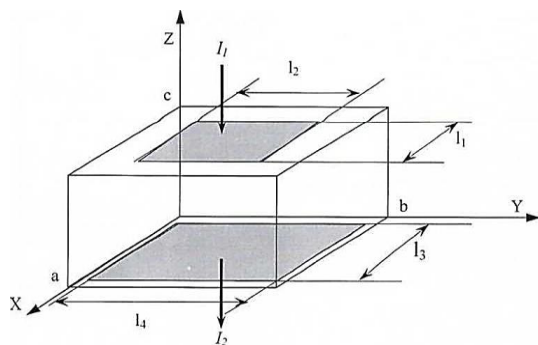


Рис. 1

Решена задача о распределении плотности тока по объему вязкого волокна в условиях, когда на электрод 1 размерами $l_1 \times l_2$ (область D_1) подано переменное напряжение U (действующее значение), а электрод 2 и корпус макета заземлены, при следующих предположениях:

- потенциал электрического поля в макете изменяется по закону $\varphi(x,y,z,t) = \dot{\varphi}(x,y,z)e^{i\omega t}$ (ω – частота поля, $\dot{\varphi}$ – комплексная амплитуда потенциала);

- рассматриваемая среда изотропна, а ее электрофизические свойства описываются проводимостью по постоянному току σ_0 и комплексной диэлектрической проницаемостью, равной $\varepsilon = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)$.

При соблюдении указанных предположений пространственное распределение комплексной амплитуды потенциала подчиняется уравнению Лапласа: $\nabla^2 \dot{\varphi} = 0$, а производная потенциала на верхней грани удовлетворяет условию:

$$\left. \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial z} \right|_{z=c} = \begin{cases} -\dot{E} = \frac{\dot{I}_1}{I_1 I_2 \sigma}, & x, y \in D_1, \\ 0, & x, y \in D_2, \end{cases} \quad (1)$$

где \dot{I}_1 – комплексная амплитуда тока, поступающего на электрод 1; $\sigma = \sigma_0 + i\omega\varepsilon_0(\varepsilon' - i\varepsilon'')$ – комплексная проводимость среды.

Решение уравнения Лапласа с граничными условиями (1) имеет следующий вид:

$$\dot{\varphi}(x, y, z) = \frac{l_1 \sigma_1 a}{\pi^3 \sigma l_1 l_2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^{m+n} \sin \frac{(2n+1)\pi l_1}{2a} \sin \frac{(2m+1)\pi l_2}{2b} \operatorname{sh} \left(\pi \sqrt{(2n+1)^2 (2m+1)^2 \left(\frac{a}{b}\right)^2} \frac{z}{a} \right)}{(2n+1)(2m+1) \sqrt{(2n+1)^2 (2m+1)^2 \left(\frac{a}{b}\right)^2} \operatorname{ch} \left(\pi \sqrt{(2n+1)^2 (2m+1)^2 \left(\frac{a}{b}\right)^2} \frac{c}{a} \right)} \sin \frac{(2n+1)\pi x}{a} \sin \frac{(2m+1)\pi y}{b}. \quad (2)$$

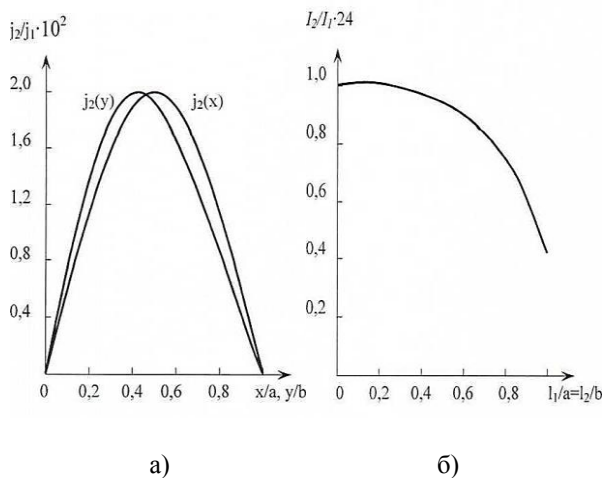


Рис. 2

Распределение плотности тока в плоскости $z=0$, рассчитанное в соответствии с (2), приведено на рис. 2-а. Если l_1/a и $l_2/b > 0,8$, то на электрод 1 идет практически весь ток, приходящийся на соответствующую грань параллелепипеда (рис. 2 – распределение тока по поверхности электрода 1 (а) и зависимость коэффициента передачи тока от относительного размера электрода 2 (б)).

На практике при проведении измерений в широком диапазоне частот удобнее регистрировать ток I_2 , поступающий на электрод 2.

трод 2, модулирующее напряжение U и разность фаз между ними. Поэтому существенное значение имеет выбор относительных размеров первого электрода: l_1/a и l_2/b (рис. 1), поскольку их величина определяет соотношение между токами I_1 и I_2 . Причина данного эффекта заключается во влиянии отношений l_1/a и l_2/b на долю тока, поступающего на боковые заземленные стенки ма-

Здесь

$$\sum_1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{(2n+1)\pi l_1}{2a} \sin \frac{(2m+1)\pi l_2}{2b}}{(2n+1)^2 (2m+1)^2} \frac{\sin \frac{(2n+1)\pi l_1}{2a} \sin \frac{(2m+1)\pi l_2}{2b}}{\operatorname{ch} \left(\pi \sqrt{(2n+1)^2 (2m+1)^2 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \left(\frac{c}{a} \right)^2} \right)},$$

$$\sum_2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin \frac{(2n+1)\pi l_1}{2a} \sin \frac{(2m+1)\pi l_2}{2b}}{(2n+1)^2 (2m+1)^2 \sqrt{(2n+1)^2 (2m+1)^2 \left(\frac{a}{b} \right)^2}}.$$

Результаты расчетов приведены рис. 2-б. Из него следует, что величины отношений l_1/a и l_2/b целесообразно выбирать больше 0,5. В этом случае отношение I_1/I_2 заметно падает из-за увеличения доли тока, текущего на боковые стенки. Для используемой геометрии измерительной ячейки потери на боковые стенки не превышают 20% от I_2 , а рассчитанные величины коэффициентов \sum_1 и \sum_2 составляют 0,02 и 0,678 соответственно.

Соотношение (4) позволяет выразить проводимости σ волокна по переменному току через ряд легко контролируемых параметров:

$$\sigma = \frac{I_2}{U} (\cos \Delta\varphi + \ell \sin \Delta\varphi) \frac{\pi}{4b} \frac{\sum_2}{\sum_1}, \quad (5)$$

где U и I_2 – действующие значения подаваемого на электрод 1 напряжения и тока в цепи второго электрода, а $\Delta\varphi$ – разность фаз между ними.

Аппроксимация частотной зависимости действительной части комплексной проводимости волокна квадратичной функцией [4], [5], вида $\operatorname{Re} \sigma = \sigma_0 + k\omega^2$, позволяет уста-

новить величину его проводимости по постоянному току путем экстраполяции частотной зависимости действительной части проводимости σ при $\sigma \rightarrow 0$.

Частотные зависимости действительной $\varepsilon'(\omega)$ и мнимой $\varepsilon''(\omega)$ части диэлектрической проницаемости волокна рассчитываются по формулам:

$$\varepsilon' = \frac{\operatorname{Im} \sigma}{\varepsilon_0 \omega}, \quad \varepsilon'' = \frac{\operatorname{Re} \sigma - \sigma_0}{\varepsilon_0 \omega}.$$

Схема экспериментальной установки для измерения электрофизических характеристик вискозного волокна приведена на рис. 3, где 1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – экспериментальный макет; 4, 6 – милливольтметры; 5 – измеритель разности фаз; 7 – частотомер.

Переменное напряжение U от генератора гармонических колебаний через усилитель 2 подается на электрод 1. К этому же электроду через частотно-независимый делитель подключены милливольтметр и первый канал измерителя разности фаз. Ток I_2 определяется по падению напряжения на сопротивлении R , к которому также подключается второй канал измерителя разности

фаз. Величина измерительного сопротивления R в зависимости от частотного диапазона варьируется от 24 Ом до 4 кОм.

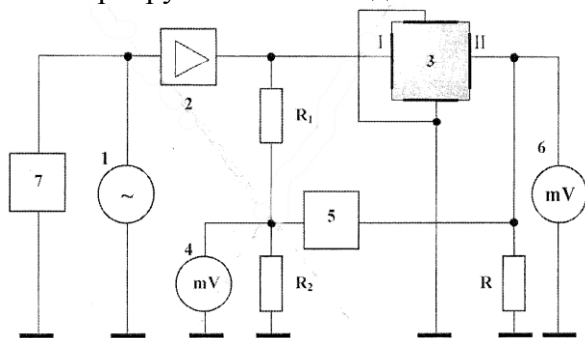


Рис. 3

Перед проведением измерений в сухое волокно массой 1 кг равномерно вводится необходимое количество воды. Затем волокно запрессовывается в макет до плотности 400 кг/м^3 и проводятся измерения частотной зависимости силы тока I_2 и его фазового сдвига относительно зондирующего напряжения U .

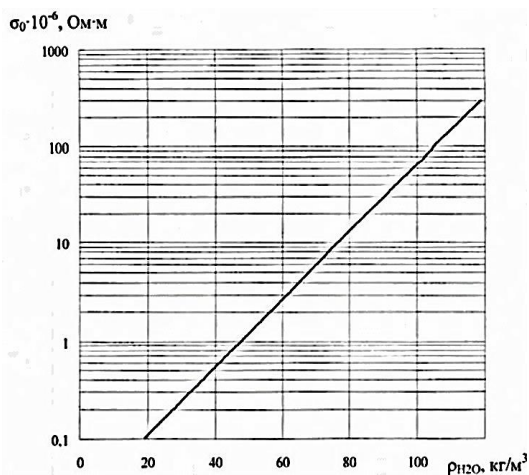


Рис. 4

На рис. 4 приведена зависимость σ_0 по постоянному току от содержания воды в волокне – $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$. В полулогарифмическом масштабе установленная зависимость представляет собой прямую линию, что указывает на степенной характер зависимости $\sigma_0 = f(\rho_{\text{H}_2\text{O}})$. В диапазоне влажности волокна от 3 до 15% проводимость σ_0 изменяется на несколько порядков.

Частотная зависимость эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{эф}}$ волокна

приведена на рис. 5: содержание воды (в граммах) в одном килограмме сухого волокна: 1 – 77; 2 – 169; 3 – 225; 4 – 240. Ее величина рассчитывается из отношения U к I_2 в предположении преимущественно емкостного характера сопротивления исследуемой пробы. Наличие связанной в капиллярах воды (электролита) приводит к величинам эффективной диэлектрической $\epsilon_{\text{эф}}$ проницаемости, превышающей соответствующие значения для компонентов системы [5].

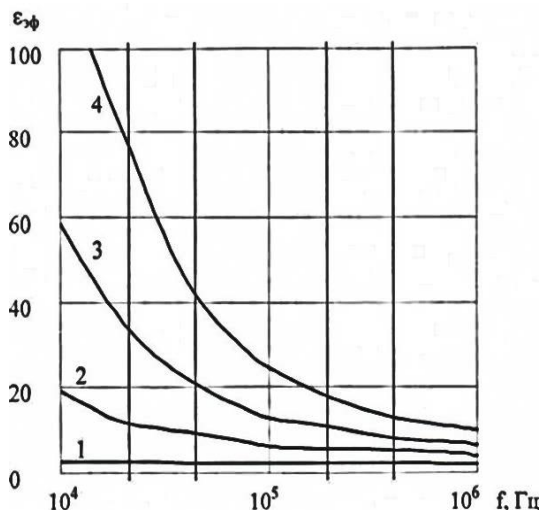


Рис. 5

Частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости вязкого волокна при изменении плотности воды в пробе представлены на рис. 5. Из них следует, что при $\rho_{\text{H}_2\text{O}} < 50 \text{ кг/м}^3$ (влажность менее 11%) ϵ'' отличается от 0 лишь на частотах, превышающих 10^5 Гц. При больших $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ на графике $\epsilon''(\omega)$ появляется максимум на частотах порядка 10^4 Гц, чему соответствует процесс ориентации адсорбированных на поверхности волокна молекул воды (диполей) в направлении приложенного электрического поля. При $\rho_{\text{H}_2\text{O}} \leq 60 \text{ кг/м}^3$ ϵ' с изменением частоты приложенного поля меняется слабо, а ее зависимость от содержания воды в волокне описывается формулой Ланжевена-Дебая:

$$\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{3} \left(\alpha_0 + \frac{p^2}{3kT\epsilon_0} \right) + \frac{\epsilon_b - 1}{\epsilon_b + 1}. \quad (6)$$

Здесь ϵ_b – диэлектрическая проницаемость сухого волокна; n_{H_2O} – концентрация молекул воды; $p=6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м – дипольный момент молекулы воды; $\alpha_0 = 1,44 \cdot 10^{-30}$ м³ – поляризуемость упругого смещения молекул воды; T – абсолютная температура.

Величина $\epsilon_b = 5,2$ определяется по уровню, до которого уменьшается диэлектрическая проницаемость высушенного волокна на частоте 6 МГц, когда вклад поляризации воды в величину ϵ' становится пренебрежимо малым. Использование соотношения (6) позволяет получить зависимость $\rho_{H_2O}(\epsilon')$ в виде:

$$\rho_{H_2O} = 248,8 \left(\frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} - 0,583 \right) \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (7)$$

Расчетные значения ρ_{H_2O} , полученные с использованием выражения (7), хорошо совпадают с количеством воды, введенной в волокно. Практически формулой (7) можно пользоваться до значений $\rho_{H_2O} < 50$ кг/м³ (влажности 11%). Полученные результаты измерений составляющей диэлектрической проницаемости ϵ' создают основу абсолютного метода определения влажности волокна в диапазоне 3...11%.

Если массовое содержание воды в волокне превышает 11%, то величина ϵ' в низкочастотной области существенно возрастает. Данный факт свидетельствует о появлении еще одного механизма поляризации молекул воды с большим характерным временем, который можно интерпретировать как макрополяризацию раствора, заполняющего отдельные поры волокна [6]. В этом случае формула Ланжевена-Дебая не дает правильных результатов. Величина ϵ' начинает сильно зависеть от частоты приложенного сигнала и даже может превысить собственную диэлектрическую проницаемость воды.

Для измерений влажности волокна наиболее удобен низкочастотный диапазон по причине высокой чувствительности ϵ' к содержанию воды в волокне. В то же время, поскольку измеряемая сила тока I_2 пропорциональна частоте приложенного сигнала,

использование слишком низких частот приводит к значительным погрешностям. Поэтому в качестве компромиссного варианта предложен диапазон частот 20...50 кГц.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты.

1. Определены оптимальные размеры электродов емкостного датчика.

2. Разработана методика исследования электрофизических свойств вискозного волокна при воздействии на него гармонического сигнала в диапазоне частот до 10 МГц.

3. Показано, что при влажности волокна, меньшей 11%, зависимость действительной части диэлектрической проницаемости волокна от содержания воды на низких частотах описывается формулой Ланжевена-Дебая.

4. Установлено, что при фиксированной массе сухого волокна и его влажности в диапазоне 3...15% содержание воды в волокне может быть определено на основании измерения действующего значения силы тока, протекающего через пробу волокна на частотах 20...50 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляева Т.А., Бобров П.П. Определение диэлектрической проницаемости хлопка на СВЧ // В сб.: Радиофизика и исследование свойств вещества. – Омск: ОмГПУ, 1994. Вып.9. С.3...10.
2. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин. – М.: Энергия, 1966.
3. Буйлов П.В., Коробов Н.А. Перспективы использования емкостного метода контроля показателей качества текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 2. С. 157...159.
4. Баранцов В.И. Особенности короткоимпульсной радиолокации заглубленных объектов // Радиотехника и электроника. – 1988. Т.33, №8. С.1776...1779.
5. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. – М.: Недра, 1976.
6. Седунов Б.И., Франк-Каменецкий Д.А. Диэлектрическая проницаемость биологических объектов // Успехи физических наук. – 1963. Т.79, №4. С.617...639.

REFERENCES

1. Belyaeva T.A., Bobrov P.P. Opredelenie dielektricheskoy pronitsaemosti khlopka na SVCh. // V sb.:

Radiofizika i issledovanie svoystv veshchestva. – Omsk: OmGPU, 1994. Vyp.9. S.3...10.

2. Foreyt I. Emkostnye datchiki neelektricheskikh velichin. – M.: Energiya, 1966.

3. Buylov P.V., Korobov N.A. Perspektivy ispol'zovaniya emkostnogo metoda kontrolya pokazateley kachestva tekstil'nykh materialov // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2012, № 2. S. 157...159.

4. Barantsov V.I. Osobennosti korotkoimpul'snoy radiolokatsii zaglublennykh ob"ektov // Radiotekhnika i elektronika. – 1988. T.33, №8. S. 1776...1779.

5. Frolov A.D. Elektricheskie i uprugie svoystva kriogennykh porod. – M.: Nedra, 1976.

6. Sedunov B.I., Frank-Kamenetskiy D.A. Dielektricheskaya pronitsaemost' biologicheskikh ob"ektov // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 1963. T.79, №4. S.617...639.

Рекомендована кафедрой электронных приборов. Поступила 29.03.16.
