

УДК 677.017

А.М. СЛІЗКОВ, О.В. ТРОФІМОВА, А.О. ПОТАПОВ

Київський національний університет технологій та дизайну

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Досліджені діелектричні властивості текстильних волокон та їх зміни внаслідок впливу різних факторів. Проведено аналіз анізотропії структури волокнистих продуктів прядильного виробництва внаслідок зміни їх діелектричної проникності.

Ключові слова: діелектрична проникність текстильних волокон, розпрямленість волокон, орієнтація волокон

Вплив електричних та магнітних полів на текстильні матеріали широко використовується в текстильній промисловості для визначення орієнтації та розпрямленості волокон при кардочесанні, у виробництві каркасної пряжі, при отриманні фасонної пряжі і нетканих матеріалів, розподіленні волокон за довжиною тощо.

Одним з перспективних напрямів застосування електродинаміки в текстильній промисловості є використання електрофізичних методів для визначення структурних показників волокнистих продуктів.

Об'єкти та методи дослідження

Волокнисті продукти прядильного виробництва (стрічка, рівниця, пряжа) та резонансний метод оцінки структури волокнистих продуктів.

Постановка завдання

Відомо, що вивчення електричних і діелектричних параметрів текстильних матеріалів проводили виключно дослідницькі лабораторії кабельної та електротехнічної промисловості, де ці матеріали широко використовуються в якості ізоляторів [1].

Проте для конструювання і раціонального використання пристроїв для визначення структурних характеристик волокнистих продуктів електрофізичними методами потрібно володіти основними відомостями про процеси, що відбуваються у волокнах при дії на них постійного і змінного електричних полів.

Результати та їх обговорення

Текстильні волокна це зазвичай діелектрики, які мають власне електричне поле з результируючим вектором напруженості $\vec{E}' = 0$ (рис. 1). Це означає, що власні заряди полімеру текстильного волокна розміщені таким чином, що сума всіх внутрішніх зарядів $q_i = 0$. При внесенні такого волокна в однорідне електричне поле з напруженістю \vec{E}_0 відбувається деформація атомів молекул, у результаті чого в волокнах виникає зміщення зарядів різних знаків один відносно одного. При цьому зсув зарядів відбувається так, щоб зменшити дію зовнішнього електричного поля. Зміщені заряди, протилежні за знаком, створюють особливий електричний момент, здатний розташувати волокна в зовнішньому полі так, щоб дія цього поля була мінімальною. Звідси діелектричні властивості волокна визначаються його поляризованістю і характеризуються діелектричною проникністю.

Текстильні волокна як органічного, так і неорганічного походження за діелектричними параметрами можуть бути розділені на два основні класи [1].

Перший клас складають волокна, в полімері яких відсутні молекули з постійним дипольним моментом (рис.2). Вони мають невелику діелектричну проникність, незначні діелектричні втрати.

Це, наприклад, волокна з неполярних полімерів: поліетилену і політетрафторетилену.

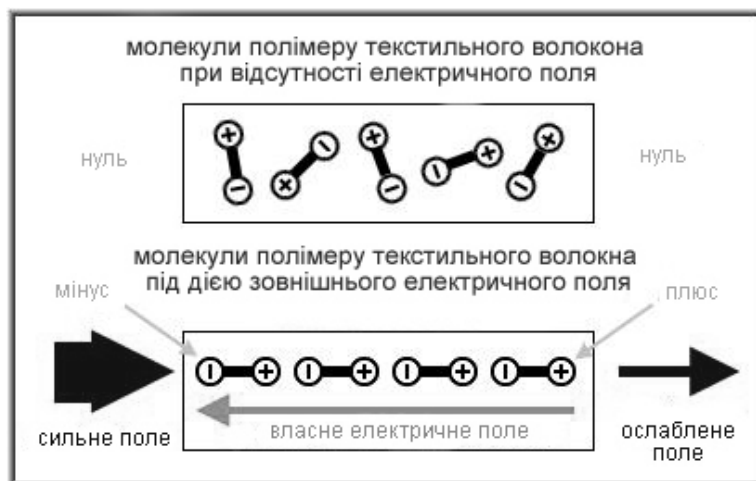


Рис.1. Характер дії електричного поля на полімер волокна [2]

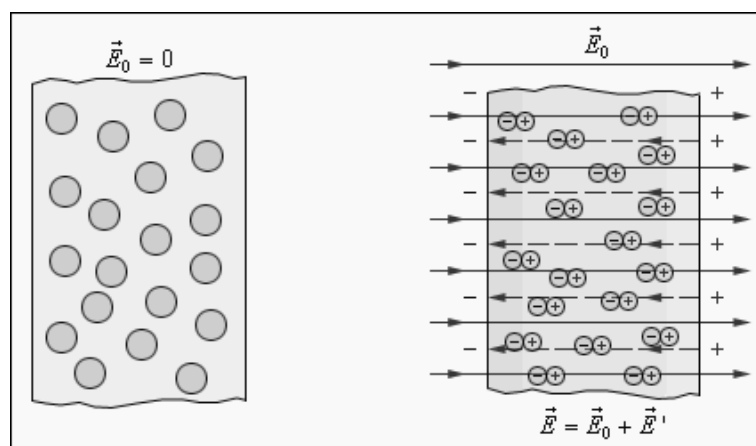


Рис.2. Електронна поляризація у полімерах волокон, в яких відсутні молекули з постійним дипольним моментом [2]

Електрична поляризація в полімерах цих волокон є в основному процесом зміни їх електронної і атомної структури [1].

До другого класу відносяться волокна, полімер яких містить молекули, що мають постійний дипольний момент (рис.3). Це наприклад, багаточисельні штучні волокна, вовна, бавовна і скловолокно. В цих матеріалах спостерігаються діелектрична дисперсія [2].

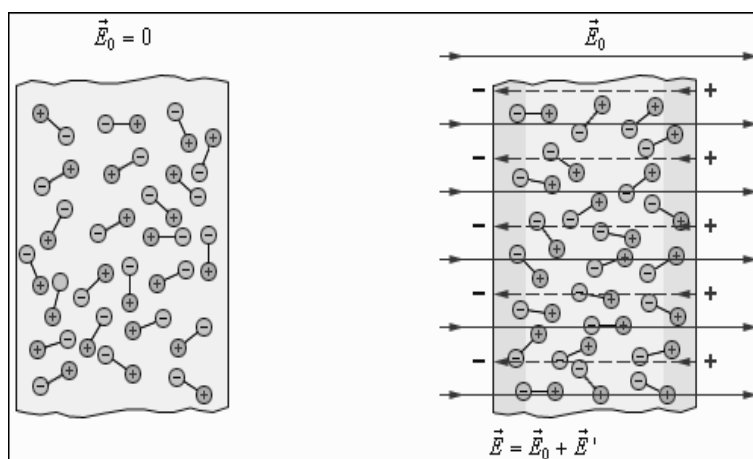


Рис.3. Електронна поляризація у полімерах волокон, які містить молекули з постійним дипольним моментом [2]

Діелектричні характеристики текстильних волокон різної молекулярної і надмолекулярної структури змінюються по-різному в залежності від вологості, температури, частоти і амплітуди напруженості зовнішнього електричного поля [3].

Відомо, що із збільшенням вологості волокон збільшується їх діелектрична проникність. Діелектрична проникність дистильованої води може бути в десятки разів вища за діелектричну проникність текстильного волокна, тому зі збільшенням вологості волокна зростає його діелектрична проникність. Величина цього приросту залежить від полімерного складу і структури волокон [4].

Збільшення температури, зменшуючи опір орієнтації диполів, що також викликає збільшення діелектричної проникності волокон [5]. Тому при проведенні досліджень з використанням електричних полів необхідно звернути особливу увагу на дотримання температурно – вологого режиму.

Частота зміни поля визначає характер поляризації молекул у полімерах волокон.

На низьких частотах диполі молекул встигають повертатися в напрямку поля, збільшуючи тим самим величину діелектричної проникності. З підвищенням частоти молекули полімеру не встигають орієнтуватись за зміною поля, що призводить до падіння діелектричної проникності волокон [5].

Оскільки майже всі текстильні волокна в більшій чи меншій мірі мають структурну анізотропію, їх діелектрична проникність також виявляється не однаковою в різних напрямках. В роботі [1] визначено діелектричну проникність текстильних волокон, розміщуючи їх паралельно і перпендикулярно силовим лініям електричного поля. Волокна, що були попередньо висушені до постійної маси, мали наступну діелектричну проникність: $E = 6$ при розміщенні вздовж силових ліній поля, та $E = 3$ у випадку їх поперечного розміщення відносно силових ліній електричного поля. Звідси слідує, що внаслідок анізотропії структури волокна його осьова поляризація значно вища ніж радіальна. Текстильні волокна складають основу всіх текстильних матеріалів (пряжі, тканин, трикотажу, нетканих виробів).

Діелектрична проникність текстильного матеріалу визначається такою формулою:

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + 4\pi \cdot \alpha), \quad (1)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму, α – діелектрична сприйнятливність волокнистого продукту.

Знаючи параметри електромагнітної хвилі (приймаючи, що $\varepsilon_0 \rightarrow 1$) та досліджуваного текстильного матеріалу, можна визначити:

$$\varepsilon - 1 \approx \frac{N \cdot \alpha \cdot \gamma}{\omega_0^2 - \omega^2 + \omega \cdot \gamma}, \quad (2)$$

де ω_0^2 – частота електромагнітної хвилі у вакуумі,

ω^2 – частота електромагнітної хвилі у волокнистому продукті,

N – кількість молекул речовини,

γ – питома вага речовини.

Оскільки текстильний матеріал складається з сукупності волокон, то його густина характеризується показником об'ємної густини σ , а не питомої ваги γ . Таким чином, формулу (2) можна змінити наступним чином:

$$\varepsilon - 1 \approx \frac{N \cdot \alpha \cdot \rho}{\omega_0^2 - \omega^2 + \omega \cdot \gamma}. \quad (3)$$

Безконтактне визначення структури стрічкоподібних волокнистих продуктів, які, як правило, є просторово неоднорідними діелектриками, базується на анізотропії їх електричних властивостей, а саме, анізотропії діелектричної проникності полімеру $\hat{\varepsilon} = \varepsilon'(1 + tg \delta)$, де ε' , $tg \delta$ – дійсна частина діелектричної проникності і тангенс кута діелектричних втрат. Тобто діелектрична проникність є комплексною величиною і тензором другого рангу [6–9].

Розглянемо, як відбувається поширення електромагнітних хвиль через анізотропний діелектричний волокнистий продукт товщиною d . Будемо вважати, що плоска лінійно-поляризована монохроматична електромагнітна хвиля визначається наступним чином:

$$E(\omega, z) = E \cdot \exp \left[i(\omega \cdot t - 2\pi \cdot z \cdot \sqrt{\varepsilon} / \lambda) \right], \quad (4)$$

де ω – відповідно частота коливань,

k – хвильове число,

λ – довжина електромагнітної хвилі.

Ця хвиля поширюється вздовж вісі OZ , а вісі OX і OY збігаються з напрямками головних значень тензора діелектричної проникності $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ (рис.4).

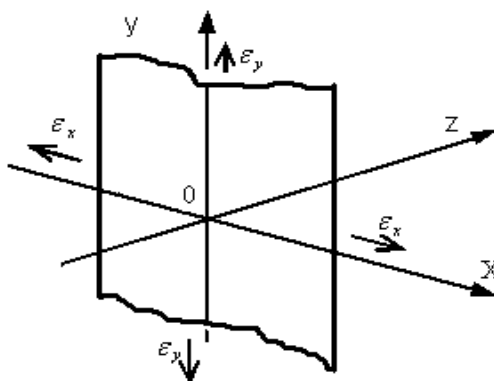


Рис. 4. Схема поширення електромагнітної хвилі через текстильний матеріал [6]

Вектор напруженості електричного поля хвилі E в загальному випадку складає з віссю OY кут θ . Складові цього вектора по осях мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} E_x &= A \cos(\omega \cdot t + \Delta x); A = E_0 \sin \theta; \\ E_y &= B \cos(\omega \cdot t + \Delta y); B = E_0 \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

де $\Delta x, \Delta y$ – різниці фаз хвилі в площині $Z = 0$.

Між хвилями, що будуть відбиті волокнистим продуктом товщиною d , або пройдуть крізь нього, за ортогональними напрямками буде мати місце фазовий зсув, який є функцією розпрямленості та орієнтації волокон в продукті.

Через анізотропію волокнистого продукту електромагнітна хвиля буде мати еліптичну поляризацію (рис. 5), за параметрами якої можна визначити ступінь розпрямленості та орієнтації волокон.

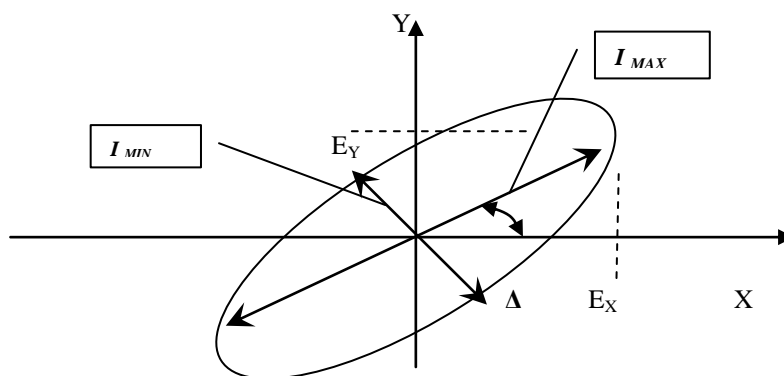


Рис.5. Поляризаційний еліпс [6]

При еліптичній поляризації електромагнітної хвилі за критерій оцінки анізотропії η можна прийняти таке співвідношення :

$$\eta = 1 - (I_{MIN} / I_{MAX}), \quad (6)$$

де (I_{MIN} / I_{MAX}) – ступінь ізотропності при поляризації, I_{MIN} – мала піввісь еліпса поляризації, I_{MAX} – величина великої півосі поляризації.

Таким чином, результуюча електромагнітна хвиля буде еліптично поляризована, що дає можливість методами еліпсометрії [7–9] безконтактно визначити структуру стрічкоподібних волокнистих продуктів.

Знаючи параметри електричних хвиль і вимірявши різниці фаз між ними, можна знайти напрямки головних осей і отримати емпіричний вираз для визначення ступеня розпрямленості волокон у продукті безконтактним методом.

Для виявлення просторової анізотропії волокнистого продукту можна використати резонатори з неоднорідним розподілом електромагнітного поля в перерізі.

Застосовуючи два резонатори, які орієнтовані у взаємно перпендикулярних напрямках, і вимірюючи різницю резонансних частот, отримаємо електричний сигнал, пропорційний ступеню анізотропії структури волокнистого продукту за певними напрямками [7, 8, 10, 11].

Структура електричної складової поля прямокутного в перерізі резонатора буде мати вигляд, представлений на рис. 6.

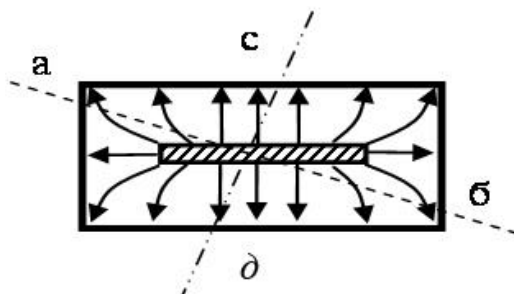


Рис. 6. Структура електричної складової поля прямокутного резонатора [6]

Напруженість електричного поля по лініях $a - b$ та $c - d$ буде суттєво різною, що буде викликати різну зміну параметрів резонатора при відповідній орієнтації волокон продукту.

Таким чином, на зміну характеристик електромагнітної хвилі, яка проходить крізь волокнистий продукт, впливає зміна його об'єму, який в свою чергу залежить від розпрямленості та орієнтації волокон.

Виходячи з того, що резонатор має прямокутну форму (рис. 5.), проходження хвиль у перпендикулярних напрямках різне і відповідно різне значення резонансної частоти при проходженні її крізь волокнистий продукт, визначаючи його анізотропію [7, 9, 11, 12].

Таким чином, відносна зміна резонансної частоти і добротності резонатора, який перебуває в контакт з волокнистим продуктом, будуть залежати від параметрів резонатора та його властивостей.

За критерій оцінки анізотропії досліджуваного волокнистого продукту, використовуючи вищенаведене, можна прийняти наступні співвідношення:

$$\eta_f = 1 - \frac{f_2 - f_1}{f_1} \quad \eta_Q = 1 - \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \quad (7)$$

де f_1 та Q_1 – резонансна частота і добротність резонатора під час контакту з волокнистим зразком вздовж його осі, f_2 та Q_2 – відповідні параметри резонатора, що перебуває в контакт з волокнистим зразком перпендикулярно його осі.

Наведена формула (7) може бути прийнята для оцінювання комплексного коефіцієнта розпрямленості та орієнтації волокон η у стрічкоподібних волокнистих продуктах, а резонансний метод може бути використаний для експрес-контролю цього показника в умовах виробництва.

Висновки

1. Діелектричні характеристики текстильних волокон різної молекулярної і надмолекулярної структури змінюються по-різному в залежності від вологості, температури, частоти і амплітуди напруженості зовнішнього електричного поля.

2. Безконтактне визначення структури стрічкоподібних волокнистих матеріалів, які є просторово неоднорідними діелектриками, базується на анізотропії діелектричної проникності полімеру з якого вони складаються.

3. Для виявлення просторової анізотропії стрічкоподібних волокнистих матеріалів доцільно використати резонатори з неоднорідним розподілом електромагнітного поля в перерізі.

Список використаної літератури

1. Радовицкий В.П., Стрельцов Б.Н. Электродинамика текстильных волокон. – М.: Легкая индустрия, 1967. – 254 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики [Электронный ресурс] / Т.И. Трофимова. – Режим доступа: <http://www.fizika.ayp.ru>
3. D.D. Cerovic, J.R. Dojcilovic, K.A. Asanovic. Investigation of dielectric properties and electric resistance of some textile materials / BPU-5: Fifth General Conference of the Balkan Physical Union, August 25–29, 2003, Vrnjačka Banja, Serbia and Montenegro. Pp. 1691–1694
4. Pourova, M. Measurement of Dielectric Properties of Moisture Textile / Microwave Techniques, 2008. COMITE 2008. 422 p.
5. Kausik Bai & K Kothari / Measurement of dielectric properties of textile materials and their applications / Indian journal of fibre and textile research. Vol. 34, June 2009, P.191–199.
6. Слізков А.М. Розвиток наукових основ прогнозування фізико-механічних властивостей текстильних матеріалів побутового призначення: автореф. дис. на здоб. наук. ступ. д-ра техн. наук: Спец. 05.02.01-матеріалознавство / А.М. Слізков; КНУТД. – К.: КНУТД, 2009. – 45 с.
7. Методы неразрушающих испытаний / Под ред. Р.Шарпа. Пер. с немецкого. – М.: Мир, 1972. – 494 с.
8. Потапов А.И. Технологический неразрушающий контроль пластмасс / А.И. Потапов, В.М. Игнатов, Ю.Б. Александров. – М.: Химия, 1979. – 288 с.
9. Най Дж. Физические свойства кристаллов / Дж. Най. – М.: Мир, 1960. – 422 с.
10. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах /А.А. Брандт. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.
11. Дюрелли А., Рейли У. Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод) / А. Дюрелли, У. Рейли. – М.: Мир, 1970. – 417 с.
12. Слізков А.М. Розробка резонансного пристрою для оцінки структури волокнистих продуктів / А.М. Слізков, В.Ю. Щербань, А.О. Потапенко // Проблеми легкой и текстильной промышленности Украины. – 2008. – № 1 (14). – С. 18–21.
13. Слізков А.М. Теоретичні основи побудови фізичної моделі електромагнітного резонатора для оцінки структури стрічкоподібних волокнистих продуктів / А.М. Слізков, В.Ю. Щербань, А.О. Потапенко // Вісник КНУТД. – 2008. – № 2. – С. 24–29.

Стаття надійшла до редакції 05.12.2013

Исследование электродинамических свойств текстильных материалов

Слизков А.М., Трофимова О.В., Потапов А.О.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Исследованы диэлектрические свойства текстильных волокон и их изменения в результате влияния разных факторов. Проведен анализ анизотропии структуры волокнистых продуктов прядильного производства в результате изменения их диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость текстильных волокон, розпрямленість волокон, ориентация волокон.

Research of electrodynamic properties of textile materials

A. Slizkov, O. Trofimova, A. Potapov

Kiev National University of Technologies and Design

Dielectric properties of textile fibres and their change are investigational as a result of influence of different factors. The analysis of anisotropy of structure of fibred products of spinning production is conducted as a result of change their inductivity.

Keywords: inductivity of textile fibres, orientation of fibres.