

У. СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

С.И. Лобко, С.Д. Туманов, В.Ф. Грожик

ОБ АНИЗОТРОПИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДРЕВЕСИНЫ

Одной из важнейших электрических характеристик древесины как электротехнического материала, представляющей теоретический и практический интерес, является диэлектрическая проницаемость ϵ . Вследствие анизотропности древесины все ее физические свойства (в том числе и ϵ) обладают анизотропией. В работе дано теоретическое рассмотрение с макроскопической точки зрения анизотропии диэлектрической проницаемости образцов из древесины на основе модели многослойного анизотропного диэлектрика. Если отвлечься от нерегулярностей в строении натуральной древесины, то очевидна ее правильная слоистая структура. Следовательно, образец из древесины в первом приближении можно рассматривать состоящим из чередующихся макроскопических слоев древесного вещества двух сортов. Каждый слой такого двухслойного диэлектрика обладает различной анизотропией диэлектрических свойств. Если рассматривать древесину как текстуру растительного происхождения [1,2], то к описанию ее свойств можно применить те же физические положения и математические расчеты, что и для кристаллов. Представим образец древесины состоящим из чередующихся слоев анизотропного диэлектрика, толщина которых соответственно d_1 и d_2 ($\frac{d_1}{d_2} = k = \text{const}$), с различными тензорами диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ik}^{(1)}$ и $\epsilon_{ik}^{(2)}$. Выберем оси координат так, чтобы тензоры $\epsilon_{ik}^{(1)}$ и $\epsilon_{ik}^{(2)}$ были приведены к главным осям, т.е. имели вид $\epsilon_{ik}^{(l)} = \delta_{ik}^{(l)} \epsilon_k^{(l)}$. Здесь $\epsilon_k^{(l)}$ главные значения тензора $\epsilon_{ik}^{(l)}$. Для этого нужно направить оси координат так, чтобы одна из них была параллельна осевой линии ствола, вторая была направлена по его радиусу и третья -- по касательной к годовичному слою.

Поскольку большинство существующих методов измерения ϵ основано на измерении отношений емкости конденсаторов с диэлектриком и без него, необходимо рассмотреть емкость конденсатора описанного выше типа. Несложный расчет дает для емкости конденсатора с двумя слоями анизотропного диэлектрика следующую формулу:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_E^{(1)}} + \frac{d_2}{\epsilon_E^{(2)}}}, \quad (1)$$

где $\epsilon_E^{(i)} = n_1^{(2)} \epsilon_1^{(i)} + n_2^{(2)} \epsilon_2^{(i)} + n_3 \epsilon_3^{(i)}$, ($n_1, n_2,$

n_3) — направляющие косинусы вектора напряженности \vec{E} в выбранной системе отсчета.

Величина $\epsilon_E = \frac{D_E}{\epsilon_0 E}$ показывает, во сколько раз вектор $\epsilon_0 \vec{E}$ короче проекции на его направление вектора электрического смещения \vec{D} [3]. Обобщая (1) на рассматриваемый случай, получим формулу

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{m \left(\frac{d_1}{\epsilon_E^{(1)}} + \frac{d_2}{\epsilon_E^{(2)}} \right)} = \frac{\epsilon_0 S}{m d_2 \left(\frac{k}{\epsilon_E^{(1)}} + \frac{1}{\epsilon_E^{(2)}} \right)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_E S}{d}, \quad (2)$$

где $d = m (d_1 + d_2) = m d_2 (1 + k)$ — полная толщина диэлектрика между пластинами конденсатора. В (2) для простоты расчета принято, что диэлектрик имеет одно и то же число m слоев каждого сорта. Из (2) окончательно получаем значение ϵ_E в направлении, перпендикулярном пластинам конденсатора, в следующем виде:

$$\epsilon_E = \frac{\epsilon_E^{(1)} \epsilon_E^{(2)} (1 + k)}{\epsilon_E^{(1)} + k \epsilon_E^{(2)}}. \quad (3)$$

Общее исследование зависимости ϵ_E от угла α между направлением электрического поля \vec{E} и осевой линией створ-

ла довольно громоздко. Ограничимся частным случаем, чаще всего имеющим место при исследовании зависимости $\varepsilon_E(\alpha)$,

а именно, будем полагать, что один из направляющих косинусов для вектора \vec{E} (например, n_3) равен 0 [4]. Именно такой случай имеет место, когда исследованию подвергаются образцы, вышливаемые так, что их плоскости составляют с осевой линией ствола углы, изменяющиеся от 0° до 90° . Для такого частного случая, подставляя в (3) $\varepsilon_E^{(i)} = n_1^2 \varepsilon_1^{(i)} + n_2^2 \varepsilon_2^{(i)}$, ($i = 1, 2$), получим ($n_1 = \cos \alpha$, $n_2 = \sin \alpha$):

$$\varepsilon_E = \frac{(1+k)(\varepsilon_1^{(1)} \cos^2 \alpha + \varepsilon_2^{(1)} \sin^2 \alpha)(\varepsilon_1^{(2)} \cos^2 \alpha + \varepsilon_2^{(2)} \sin^2 \alpha)}{k(\varepsilon_1^{(2)} \cos^2 \alpha + \varepsilon_2^{(2)} \sin^2 \alpha) + (\varepsilon_1^{(1)} \cos^2 \alpha + \varepsilon_2^{(1)} \sin^2 \alpha)} \quad (4)$$

Для вычисления хода зависимости $\varepsilon_E(\alpha)$ определим экстремальные значения функции $\varepsilon_E(\alpha)$. Расчет дает следующие экстремальные значения $\varepsilon_E(\alpha)$:

$$\varepsilon_E^{(1)} = \frac{(1+k) \varepsilon_1^{(1)} \varepsilon_1^{(2)}}{k \varepsilon_1^{(2)} + \varepsilon_1^{(1)}}; \quad \varepsilon_E^{(2)} = \frac{(1+k) \varepsilon_2^{(1)} \varepsilon_2^{(2)}}{k \varepsilon_2^{(2)} + \varepsilon_2^{(1)}}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_E^\pm = & \frac{(1+k) (\varepsilon_1^{(1)} \varepsilon_2^{(2)} - \varepsilon_1^{(2)} \varepsilon_2^{(1)})}{(k \varepsilon_1^{(2)} + \varepsilon_1^{(1)} - k \varepsilon_2^{(2)} - \varepsilon_2^{(1)})^2} \left[\varepsilon_1^{(1)} - \varepsilon_2^{(1)} + \right. \\ & \left. + k (\varepsilon_2^{(2)} - \varepsilon_1^{(2)}) \pm 2 \sqrt{\frac{a}{k}} \right], \end{aligned}$$

где $a = (\varepsilon_1^{(2)} - \varepsilon_2^{(2)}) (\varepsilon_2^{(1)} - \varepsilon_1^{(1)})$.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. В интервале изменения угла α от 0° до 90° будут иметь место четыре экстремальных значения функции $\varepsilon_E(\alpha)$. $\varepsilon_E^{(1)}$ и $\varepsilon_E^{(2)}$ соответствуют углам $\alpha = 0$ и $\alpha = \frac{\pi}{2}$. При этом $\varepsilon_E^{(1)} \neq \varepsilon_E^{(2)}$.

2. Кроме того, в случае $a > 0$ будут еще два экстремальных значения, соответствующие минимуму и максимуму ϵ_E , отличающиеся от некоторого среднего ее значения на одну и ту же величину, так что кривая в этой области имеет синусоподобную форму. Как видно из (5), все экстремальные значения $\epsilon_E(\alpha)$ зависят от главных значений тензоров ϵ_{ik} и ϵ_{ik} и от отношения толщин слоев диэлектрика k , т.е. полностью определяются свойствами слоев диэлектрика.

3. Условие $a > 0$ будет выполняться в двух случаях:

$$1) \epsilon_2^{(1)} > \epsilon_1^{(1)}, \quad \epsilon_1^{(2)} > \epsilon_2^{(2)} \quad \text{и} \quad 2) \quad \epsilon_2^{(1)} < \epsilon_1^{(1)}, \quad \epsilon_1^{(2)} < \epsilon_2^{(2)}.$$

Это значит, что тензоры диэлектрических проницаемостей будут изображаться такими эллипсами, один из которых вытянут вдоль 1-ой оси, второй — вдоль 2-ой, и наоборот. В первом случае оба сомножителя в ϵ_E^- (5) отрицательны, причем второй множитель больше по абсолютной величине, чем для значения ϵ_E^+ . Следовательно, значение ϵ_E^- будет максимальным, а ϵ_E^+ — минимальным. Причем из требования $\epsilon_E^+ > 0$ вытекает, что должно иметь место неравенство

$$(\epsilon_1^{(2)} - \epsilon_2^{(2)}) (\epsilon_2^{(1)} - \epsilon_1^{(1)}) > 4k \left[(\epsilon_2^{(1)} - \epsilon_1^{(1)}) + k (\epsilon_1^+ - \epsilon_2^+) \right]^2, \quad (6)$$

которое накладывает определенную зависимость между главными значениями тензоров диэлектрической проницаемости и толщиной слоев k . Во втором случае оба сомножителя в ϵ_E^+ положительны, и при том же ограничении (6) значение ϵ_E^+ будет максимальным, а ϵ_E^- — минимальным. В случае однотипной вытянутости эллипсоидов диэлектрической проницаемости зависимость $\epsilon_E(\alpha)$ будет монотонно убывающей или возрастающей функцией α .

4. Изложенные выше теоретические выкладки хорошо согласуются в первом приближении с полученной нами экспериментально зависимостью $\epsilon_E(\alpha)$ для древесины березы в слу-

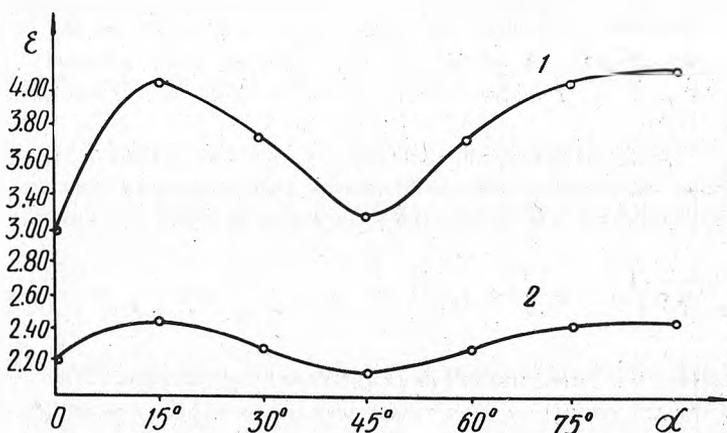


Рис. 1. Зависимость ϵ_E от угла между направлением вектора напряженности E и направлением волокон древесины березы:

1 — для абсолютно сухого состояния; 2 — для случая влажности 7%.

чае абсолютно сухого состояния и при влажности 7% (рис. 1). Измерения ϵ_E проводились согласно стандартным методикам на куметрах типа Е9-4 и Е9-5 при одинаковых условиях ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, относительная влажность $(65 \pm 5)\%$). Каждая точка графика получена в результате усреднения значений $\epsilon_E(\alpha)$ по измерениям на 10 образцах, которые по всем параметрам были одинаковыми. Из рис. 1 четко видна анизотропия ϵ_E и описанный выше ход кривой.

Л и т е р а т у р а

1. Баженов В.А. Пьезоэлектрические свойства древесины. М., 1959. 2. Шубников А.В. Пьезоэлектрические текстуры. М., 1946. 3. Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков. М., 1968. 4. Спиридонов В.М., Лобко С.И. Об анизотропии электропроводности древесины комнатно-сухого состояния. — В сб.: Механическая технология древесины. Вып. 4. Минск, 1974.