

М.Ф. Лукашевич, инженер; И.О. Оробей, доцент; И.Ф. Кузьмицкий, доцент

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПОЛИМЕРОВ

The scheme of the device for measurement of a dielectric factor of polymers is reduced. The mathematical model of the given device and expression for definition of a dielectric factor is output

Электрические свойства полимеров лежат в основе их технических применений. Некоторые свойства удобны для проведения структурно-кинетических исследований, например, для исследования поляризации диэлектриков, диэлектрических потерь и проницаемости полимеров. Диэлектрические потери характеризуют рассеяние энергии, которая выделяется в виде тепла за единицу времени диэлектриком при приложении к нему электрического поля. Эти потери в полимерах связаны с возникновением в них поляризации при наличии электрического поля, меняющегося во времени.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  характеризует увеличение емкости конденсатора  $C$  при внесении в него диэлектрика по сравнению с емкостью  $C_0$  того же конденсатора с воздухом в качестве диэлектрика, т. е.  $\epsilon' = C/C_0$ . Диэлектрическую проницаемость можно представить в комплексном виде  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ . Параметрами, характеризующими поведение полимерного диэлектрика в переменном электрическом поле, являются  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ . Для получения более полной информации о поведении полимера в переменных электрических полях исследуют зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  в определенном диапазоне частот и температур, по которым можно охарактеризовать молекулярную подвижность в полимере, определить концентрацию и величину диполей в полимере, найти функцию распределения диполей по временам релаксации [1].

В настоящее время применяют бесконтактные и контактные методы измерений, в которых образец помещают между двумя неподвижно закрепленными электродами (обкладками) с фиксированным расстоянием между ними. При размещении между электродами образца определяют  $C$ , без образца между электродами определяют  $C_0$ , по которым рассчитывают значение диэлектрической проницаемости и потерь. При измерении в основном применяют мостовые схемы, но, кроме этого, можно использовать и генераторные схемы. На рисунке представлена принципиальная схема такого устройства для измерения диэлектрической проницаемости полимеров [2].

Устройство состоит из автодинного генератора на транзисторах VT 1–VT 3 и детектора амплитуды поглощения электрического поля. В колебательный контур генератора включен конденсатор  $C_d$ , между обкладками которого помещается исследуемый образец. Дифференциальное уравнение для напряжения на обкладках конденсатора  $C_d$  получено по законам Кирхгофа для мгновенных значений при допущении, что напряжениями на конденсаторах  $C_1$  и  $C_4$  на частоте генерации, а также входным током транзистора VT 1 можно пренебречь. Кроме этого, при выводе дифференциального уравнения крутизна вольт-амперной характеристики биполярного транзистора аппроксимировалась разложением в ряд Тейлора до квадратичного члена.

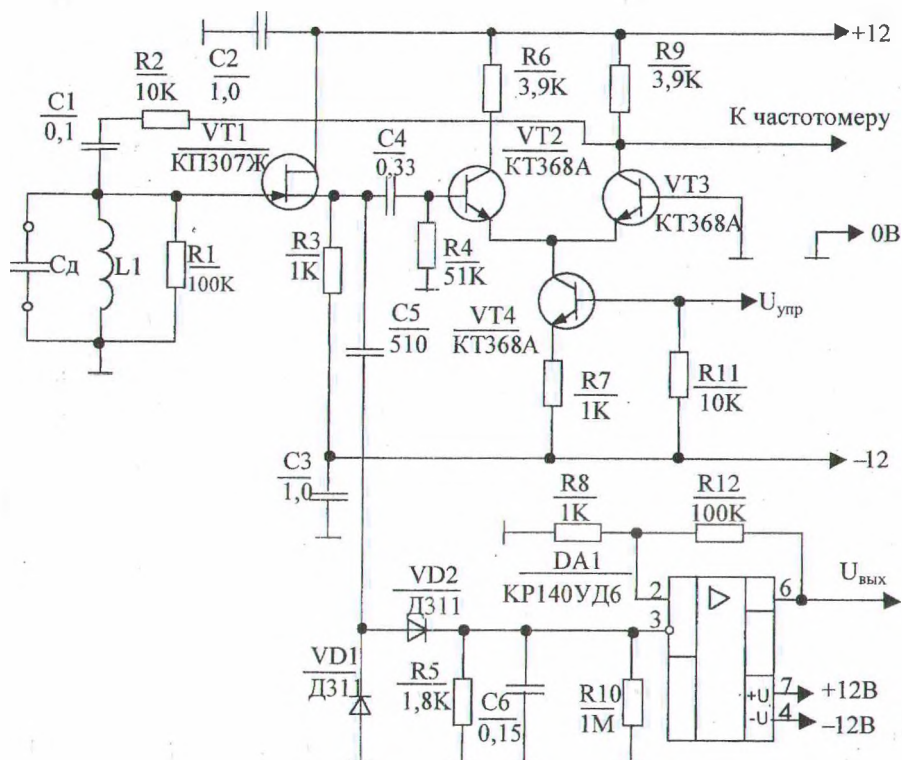


Рисунок. Принципиальная схема устройства измерения диэлектрической проницаемости полимеров

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение напряжения на обкладках конденсатора  $C_d$ , имеет вид

$$\frac{d^2 U}{dt^2} + \left[ \frac{1}{C_d R_1} - \frac{R_9 U_{\text{упр}} + R_9 U_{\text{БЭ}}}{4 R_7 R_2 \varphi_T C_d} + \frac{1}{R_2 C_d} + U \frac{(U_{\text{упр}} - U_{\text{БЭ}}) R_9}{4 R_7 R_2 \varphi_T^2 C_d} - U^2 \frac{3 R_9 (U_{\text{упр}} - U_{\text{БЭ}})}{16 R_7 R_2 \varphi_T^3 C_d} \right] \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 U = 0, \quad (1)$$

где  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_d}$  – собственная частота контура;  $U_{\text{упр}}$  – напряжение, управляющее интенсивностью электрического поля;  $U_{\text{БЭ}}$  – падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT 4;  $\varphi_T$  – термический потенциал.

Решение уравнения (1), получаемое методом медленно меняющихся амплитуд, имеет вид

$$U(t) = \sqrt{\frac{64 R_7 \varphi_T^3 R_2 C_d - 16 R_1 R_9 \varphi_T^2 U_{\text{упр}} + 16 R_1 R_9 U_{\text{БЭ}} \varphi_T^2 + 64 R_1 R_7 \varphi_T^3}{3 R_1 R_9 (U_{\text{упр}} - U_{\text{БЭ}}) (1 + k_1 e^{k_2 t})}} \sin \omega_0 t, \quad (2)$$

где

$$k_2 = \frac{4 R_7 \varphi_T R_2 C_d - R_1 R_9 U_{\text{упр}} + R_1 R_9 U_{\text{БЭ}} + 4 R_1 R_7 \varphi_T}{4 R_7 R_2 R_1 \varphi_T C_d};$$

$$k_1 = \frac{64 R_7 \varphi_T^3 R_2 C_d - 16 R_1 R_9 \varphi_T^2 U_{\text{упр}} + 16 R_1 R_9 U_{\text{БЭ}} \varphi_T^2 + 64 R_1 R_7 \varphi_T^3}{3 R_1 R_9 (U_{\text{упр}} - U_{\text{БЭ}}) U_{00}^2} - 1,$$

где  $U_{00}$  – значение амплитуды сигнала при включении схемы (при включении питания значение амплитуды равно нулю).

В установившемся режиме (при  $t \rightarrow \infty$ ) выражение (2) можно переписать в виде

$$U(t) = \sqrt{\frac{64 R_7 \varphi_T^3 R_2 C_D - 16 R_1 R_9 \varphi_T^2 U_{\text{нпр}} + 16 R_1 R_9 U_{\text{БЭ}} \varphi_T^2 + 64 R_1 R_7 \varphi_T^3}{3 R_1 R_9 (U_{\text{нпр}} - U_{\text{БЭ}})}} \sin \omega_0 t. \quad (3)$$

Данный сигнал поступает на вход детектора, выполненного на диодах VD 1 и VD 2, и далее через усилитель DA 1 на выход схемы. Напряжение на выходе схемы определяется напряжением  $U(t)$  и коэффициентом усиления усилителя, т. е.

$$U_{\text{вых}}(t) = k U(t), \quad (4)$$

где  $k = -R_{12}/R_8$ .

При отсутствии исследуемого образца, т. е. при  $C_D = C_0$ , квадрат выходного напряжения после подстановки (3) в (4) запишется в виде

$$U_0^2 = \frac{(64 R_7 R_2 \varphi_T^3 C_0 - 16 R_1 R_9 \varphi_T^2 U_{\text{нпр}} + 16 R_1 R_9 U_{\text{БЭ}} \varphi_T^2 + 64 R_7 R_1 \varphi_T^3) R_{12}^2}{3 R_1 R_9 (U_{\text{нпр}} - U_{\text{БЭ}}) R_8^2}. \quad (5)$$

При помещении между обкладками конденсатора исследуемого образца с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon'$  изменяется емкость  $C_D = \varepsilon' C_0$  и, следовательно, выходная частота генератора. Данное изменение частоты можно наблюдать с помощью частотомера. Далее диэлектрическую проницаемость можно вычислить по формуле

$$\varepsilon' = \omega_{00}^2 / \omega_{01}^2, \quad (6)$$

где  $\omega_{00}$  – частота генерации без диэлектрика между обкладками;  $\omega_{01}$  – частота генерации с диэлектриком.

Кроме этого, конденсатор с диэлектриком, обладающим диэлектрическими потерями, можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из той же емкости с диэлектриком без диэлектрических потерь и присоединенного к ней резистора с сопротивлением  $R_{\text{пот}}$  [3]. В этом случае общее сопротивление колебательного контура будет представлено как параллельное соединение резистора  $R_1$  и сопротивления  $R_{\text{пот}}$ , т. е.  $R_k = R_1 R_{\text{пот}} / (R_1 + R_{\text{пот}})$ , и квадрат амплитуды выходного сигнала принимает вид

$$U_1^2 = \frac{(64 R_7 R_2 \varphi_T^3 \varepsilon' C_0 - 16 R_k R_9 \varphi_T^2 U_{\text{нпр}} + 16 R_k R_9 U_{\text{БЭ}} \varphi_T^2 + 64 R_7 R_k \varphi_T^3) R_{12}^2}{3 R_k R_9 (U_{\text{нпр}} - U_{\text{БЭ}}) R_8^2}. \quad (7)$$

Выражая из (5)  $C_0$  и подставляя его, а также  $R$  и  $\varepsilon'$  в (7), находим значение  $R_{\text{пот}}$ :

$$R_{\text{пот}} = \frac{\varepsilon' R_1 [(U_{\text{нпр}} - U_{\text{БЭ}}) (3 R_8^2 + 16 R_{12}^2 \varphi_T^2) R_9 - 64 R_7 \varphi_T^2 R_{12}^2]}{R_9 R_8^2 (U_{\text{нпр}} - U_{\text{БЭ}}) (U_1^2 + U^2 \varepsilon') + (\varepsilon' - 1) (16 R_9 \varphi_T^2 (U_{\text{БЭ}} - U_{\text{нпр}}) + 64 R_7 \varphi_T^3) R_{12}^2}$$

Диэлектрические потери полимера определяются как [3]:

$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega_{01} R_{\text{пот}} C}$$

Таким образом, измерив амплитуду сигнала на выходе устройства и частоту колебаний без присутствия полимера между обкладками конденсатора и в его присутствии, можно вычислить диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери полимера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Курс физики полимеров / Под ред. проф. С.Я. Френкеля. – Л.: Химия, 1976.
2. Труды БГТУ. Сер. физ.-мат. наук и информ. – Мн. Вып. XI. 2003.
3. Лушечкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров. – М.: Химия, 1988.