

В оценках спектральной плотности мощности $y(t)$ увеличиваются составляющие спектра в диапазоне частот, близких к резонансной частоте САР. Выделение информативной части спектра $y(t)$ с помощью полосового фильтра позволяет оценить рост дисперсии сигнала в этой полосе, которая пропорциональна росту коэффициента передачи $k_o(t)$ ОУ.

Заключение. Разработанные варианты САР и модели координатных возмущений позволяют обоснованно подходить к организации многофакторных компьютерных экспериментов для исследования самонастраивающихся САР. Их конечная цель — определение структуры САРС и формулирование методик настройки их алгоритмов.

Литература

1. Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст]: пер. с англ. / Р. Изерман; ред. И. М. Макаров. — М.: Мир, 1984. — 541 с. : ил.
2. Мовчан, А. П. Адаптивні та параметрично-оптимальні системи управління [Текст]: навчальний посібник / А. П. Мовчан, О. В. Степанець — К.: НТУУ «КПІ», 2011. — 108 с.
3. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования [Текст]: справочное пособие / ред. А. С. Клюев. — 2-е изд., перераб и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 368 с.
4. Самонастраивающиеся системы [Текст]: справочник / А. Г. Ивахненко, П. И. Чинаев, Н. М. Чумаков; под общ. ред. П. И. Чинаева. — Киев: Наукова думка, 1969. — 528 с.
5. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы [Текст]: учебное пособие / А. Г. Александров. — М.: Высшая школа, 1989. — 264 с.
6. Черных, И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений [Текст] / И. В. Черных; под общ. ред. к. т. н. В. Г. Потемкина. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ. — 2003. — 491 с.: ил.

УДК 537.226.678.01

ПОСТРОЕНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА «ПОЛЯРИЗАЦИЯ – НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ» В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРАХ

Федосов С. Н., д-р физ.-мат. наук, профессор, Сергеева А. Е., д-р физ.-мат. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Предложен новый метод изучения гистерезиса поляризация — напряженность поля на основе соответствующего изучения экспериментально зарегистрированной кинетики электретного потенциала в процессе коронной электризации при постоянном токе зарядки. В тех же экспериментах измеряются эффективная удельная электропроводность и диэлектрическая постоянная. В качестве примера, получена зависимость $P(E)$ для поливинилиденфторида (ПВДФ), а также найдены значения коэрцитивного поля и остаточной поляризации.

A new method is proposed to study polarization - field hysteresis based on the appropriate treatment of experimentally recorded kinetics of the electret potential during the constant current corona poling. The apparent conductivity and the dielectric constant have been measured in the same experiments. As an example, the $P(E)$ dependence for polyvinylidene fluoride (PVDF) have been obtained, as well as values of the coercive field and the remnant polarization.

Ключевые слова: поляризация, сегнетоэлектрический гистерезис, ПВДФ

1. Введение. Поляризации (P) в сегнетоэлектрических полимерах зависит нелинейно от напряженности поля (E), так что функция $P(E)$ представляется петлей гистерезиса. Определение коэрцитивного поля (E_c) и остаточной поляризации (P_r) из этой зависимости является важным не только для выбора параметров электризации, но также для оценки пьезоэлектрических и пьезоэлектрических свойств поляризованных пленок. Для корректного получения функции $P(E)$, следует учитывать некоторые важные особенности. Прежде всего, обычно используемые схемы Сойлера-Тауэра [1] не применимы в случае сегнетоэлектрических полимеров, так как максвелловское время релаксации находится в диапазоне сотен секунд [2]. Поэтому корректные измерения должны проводиться на инфранизких частотах. Кроме того, необходимо извлекать поляризационную составляющую из полного тока электризации и отделять ее от двух других компонент, соответствующих емкостному току и току проводимости. Кроме того, в расчетах функции

$P(E)$ необходимо учитывать значение эффективного сопротивления и нельзя брать значение диэлектрической проницаемости (ϵ) из справочников из-за ее сильной зависимости от частоты, так как приведенные значения, как правило, соответствуют частоте 1 кГц. Все эти особенности не были последовательно учтены ранее, хотя попытки получить петли гистерезиса $P(E)$ в сегнетоэлектрических полимерах делались неоднократно [3—5].

Стоит отметить, что почти все данные о гистерезисе $P(E)$ в сегнетоэлектрических полимерах получены путем прямого приложения напряжения к электродам образца, в то время как в настоящее время обычной практикой для электризации полимеров является использование коронного разряда.

Мы разработали новый метод получения зависимости $P(E)$ из экспериментальной кинетики электретного потенциала при первичной коронной электризации постоянным током, а также при повторной электризации и переключении поляризации в коронном разряде противоположной полярности, но при той же величине зарядного тока.

Разработанный нами метод существенно отличается от описанного в работе [4] тем, что мы использовали в расчетах истинное значение диэлектрической проницаемости и не пренебрегали эффективной удельной проводимостью, экспериментально измеряя оба параметра непосредственно в процессе электризации.

2. Эксперимент. Покажем, как применить предлагаемый метод для нахождения зависимости $P(E)$ в пленках поливинилиденфторида (ПВДФ). Экструдированные и одноосновытянутые пленки ПВДФ толщиной 25 мкм с электродами, нанесенными с одной стороны образца путем испарения алюминия в вакууме, подвергали электризации в коронном триоде при постоянном токе [6].

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Коронный разряд был инициирован заостренным вольфрамовым электродом с отрицательным потенциалом, который управлялся схемой обратной связи для поддержания постоянного тока. В то же время, постоянный потенциал — 3 кВ прикладывали к вибрирующей сетке, при этом переменная компонента тока была пропорциональна разности потенциалов между сеткой и поверхностью пленки, которую обычно называют электретным потенциалом.

Для управления напряжением коронного разряда использована постоянная составляющая тока. В наших опытах устанавливалась плотность тока 100 мкА/м², а электретный потенциал $V(t)$ непрерывно измерялся и регистрировался самопишущим прибором.

Для управления напряжением коронного разряда использована постоянная составляющая тока. В наших опытах устанавливалась плотность тока 100 мкА/м², а электретный потенциал $V(t)$ непрерывно измерялся и регистрировался самопишущим прибором.

3. Результаты и обсуждение. Три экспериментальные кривые кинетики электретного потенциала показаны на рис. 2. Кривая 1 получена при первичной электризации образца. Кривая 2 соответствует повторной электризации после короткого замыкания образца и выдержки в течение 5 мин. Кривая 3 соответствует переключению поляризации путем изменения полярности напряжения на коронирующем электроде и сетке с минуса на плюс.

Когда электретный потенциал при первичной электризации становится равным потенциалу сетки, цепь обратной

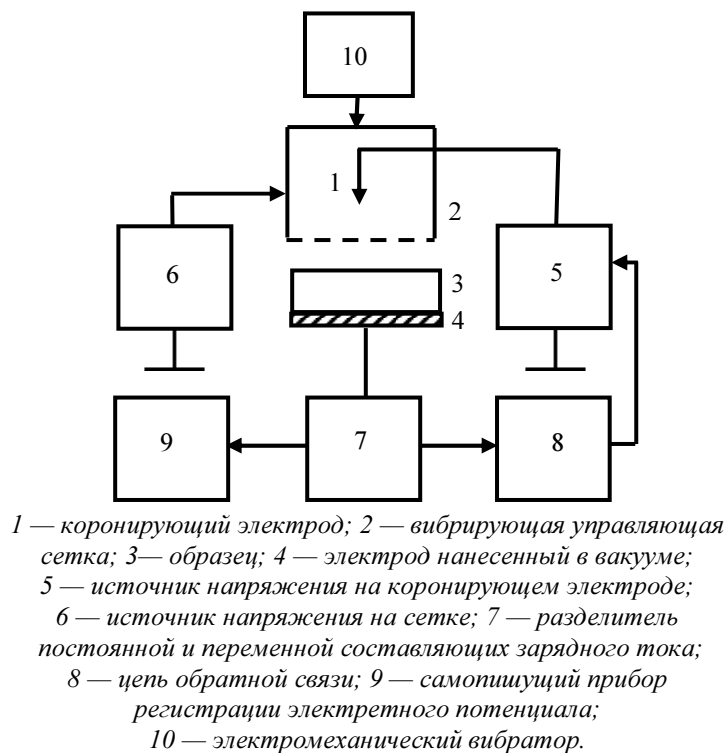


Рис. 1 — Блок-схема экспериментальной установки

ной связи стабилизации зарядного тока отсоединяется во избежание резкого возрастания потенциала и пробоя образца. Как видно из кривой 4 на рис. 2, ток после отключения цепи обратной связи уменьшается от 100 мкА/м² до стационарного значения 9 мкА/м², рассматриваемого как чистый ток проводимости. Мы намерены доказать, что данные, представленные на рис. 2, достаточны для построения функции $P(E)$, то есть для графического изображения петли гистерезиса.

Используем в расчетах приближение однородного поля и поляризации в направлении толщины образца, то есть P и E считаются только функциями времени. Тогда можно записать следующее уравнение для полной плотности тока

$$i(t) = \varepsilon \varepsilon_o \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dP(t)}{dt} + g \cdot E(t), \quad (1)$$

где ε — диэлектрическая постоянная;

ε_o — электрическая постоянная;

g — эффективная удельная проводимость.

Интегрируя уравнение (1) в течение долгого времени и учитывая, что $V(t) = d_o \cdot E(t)$, где $V(t)$ — экспериментально измеряемый электретный потенциал, d_o — толщина образца, получаем

$$\frac{\varepsilon \varepsilon_o}{d_o} [V(t) - V(0)] + P(t) - P(0) + \frac{g}{d_o} \int_0^t V(t') dt' = i_o t \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо для всех трех экспериментальных кинетик, показанных на рис. 2, но при разных начальных условиях, а именно

$$V_1(0) = 0; P_1(0) = 0; \text{ (первичная электризация)} \quad (3a)$$

$$V_2(0) = 0; P_2(0) = P_s(t); \text{ (повторная электризация)} \quad (3b)$$

$$V_3(0) = 0; P_3(0) = P_s \text{ (переключение поляризации)} \quad (3c)$$

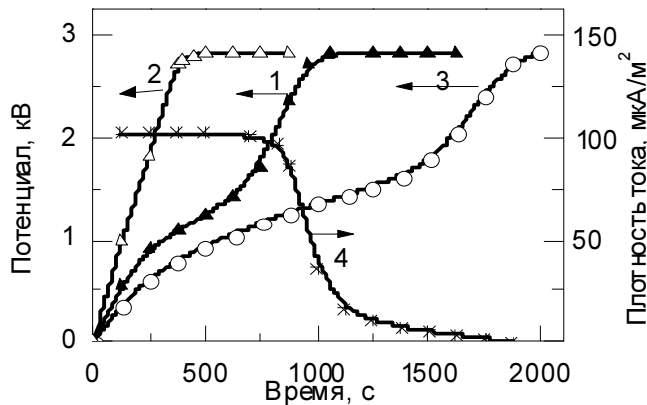
Индексы при V и P указывают на номер эксперимента, P_s — поляризация насыщения, соответствующая напряжению V_s . Если напряжение V_s и плотность стационарного тока i_s известны, то можно вычислить эффективную удельную проводимость g и диэлектрическую проницаемость ε с учетом экспериментальной кривой $V_2(t)$ (рис. 2, кривая 2) и уравнений (2) и (3b)

$$g = \frac{d_o i_s}{V_s}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \left[\frac{1}{\varepsilon_o} V_2(t) \right] \left[i_o d_o t - g \int_{t_1}^{t_2} V_2(t') dt' \right] \quad (5)$$

Далее можно получить уравнение для кинетики первичной электризации с учетом экспериментальной кривой $V_1(t)$ (рис. 2, кривая 1), а также из уравнений (2) и (3a)

$$P_1(t) = i_o t - \frac{\varepsilon \varepsilon_o}{d_o} V_1(t) - \frac{g}{d_o} \int_0^t V_1(t') dt' \quad (6)$$



1 — в течение первичной электризации ПВДФ в коронном разряде; 2 — повторная электризация; 3 — переключение поляризации при постоянном токе 100 мкА/м²; 4 — временная зависимость тока после окончания первичной электризации.

Рис. 2 — Кинетика электретного потенциала

$d_o = 25$ мкм, $i_s = 9$ мкА/м² и $V_s = 2,9$ кВ, из уравнения (4) рассчитана величина $g = 8 \cdot 10^{-14}$ Ом⁻¹ · м⁻¹. Из кри-

Часть функции $P(E)$, связанную с первичной электризацией, можно найти из уравнения (6) и экспериментальной кривой $V_1(t)$, исключая время в качестве параметра. Аналогично можно записать уравнение для кинетики переключения

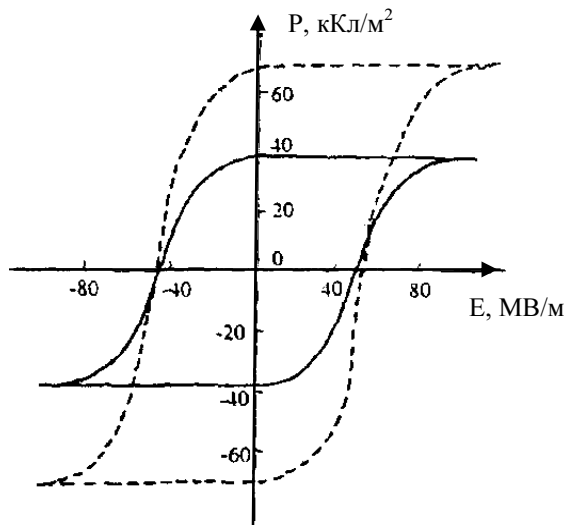
$$P_3(t) = \frac{\varepsilon \varepsilon_o}{x} V_3(t) + P_s + \frac{g}{x} \int_{t_2}^{t_3} V_3(t') dt' - i_o t \quad (7)$$

Часть функции $P(E)$, соответствующая переключению поляризации, находится из экспериментальных значений $V_3(t)$ (рис. 2, кривая 3) и расчета поляризации $P_3(t)$ в соответствии с формулой (7) в те же моменты времени.

Экспериментально было обнаружено, что кинетики электретного потенциала в течение последующих переключений не отличаются от $V_3(t)$. Это указывает на то, что петли гистерезиса $P(E)$ замкнуты (рис. 3).

Обсудим численные значения параметров, используемых в расчетах по формулам (4)–(7). Учитывая, что

вой 2 на рис. 2 в определенной точке, например, $t_1=250$ с и $V_2(t_1)=1,76$ кВ, получаем $\int_{t_1}^{t_2} V_2(t') dt' = 2,2 \cdot 10^5$ В·с. Подставляя эти данные в уравнение (5) и учитывая, что $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $i_0=100$ мкА/м² находим $\varepsilon=40$. Затем из уравнения (6) рассчитаем P_s в момент, соответствующий третьей части кривой 1 на рис. 2, где поляризация завершена, например, при $t_2=900$ с и $V_1=2,9$ кВ. Интегрируя кривую 1 на рис. 2, графически получаем $\int_0^{t_2} V_1(t') dt' = 13 \cdot 10^5$ В·с и, подставляя результат в уравнение (6), находим $P_s=42$ мКл/м². Для получения коэрцитивного поля, нужно найти точку на кривой 3 рис. 2, в которой поляризация, рассчитанная по формуле (7), равна нулю. Эта точка в нашем случае соответствует $t_3=650$ с и $V_3(t_3)=1,2$ кВ. Наконец вычисляем коэрцитивное поле $E_c = \frac{V_3(t_3)}{d_0} = 48 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$.



Петли гистерезиса, рассчитанные из экспериментальных данных рис. 2 в соответствии с предложенным методом (сплошная линия) и в предположении $g=0$ и $\varepsilon=10$ (пунктирная линия).

Рис. 3 — Петли гистерезиса $P(E)$ в пленках ПВДФ

Как видно из кривой 3 на рис. 2, переключение поляризации происходит за время порядка 1800 с. Это означает, что одна петля гистерезиса завершается в течение одного часа, т.е. эквивалентная частота эксперимента составляет $2,8 \cdot 10^{-4}$ Гц. На рис. 3 показано, что если пренебречь проводимостью и не учитывать частотную зависимость диэлектрической постоянной, получается ошибка около 80 %. В результате, величина остаточной поляризации P_s будет в значительной степени завышена. Относительно высокое значение диэлектрической проницаемости ($\varepsilon=40$) на сверхнизких частотах объясняется, вероятно, миграцией и медленным накоплением зарядов на границах кристаллитов (эффект Максвелла-Вагнера).

4. Заключение. Мы считаем, что разработанный нами метод изучения $P(E)$ гистерезиса в сегнетоэлектрических полимерах обеспечивает более точные и надежные значения коэрцитивного поля и остаточной поляризации, чем другие методы.

Литература

1. Lines, M. Ferroelectrics and Related Materials [Text] / M. Lines M., A. Glass. – Pergamon Press, N Y. – 2008. – 736 p.
2. Сергеева, А. Е. Поляризация и пространственный заряд в сегнетоэлектрических полимерах [Текст] / А. Е. Сергеева, С. Н. Федосов. – Одесса: ТЭС, 2014. – 347 с.
3. Furukawa, T., Factors governing ferroelectric switching characteristics in thin films of VDF/TrFE copolymers [Text] / T. Furukawa, T. Nakajima, Y. Takahashi // Proc. Int. Symp. Electrets, ISE – 2005 – № 12. – P. 129–131.
4. Alves, N. Measuring hysteresis loops of ferroelectric polymers using the constant charging current corona triode [Text] / N. Alves, J. A. Giacometti, O. N. Oliveira // Rev. Sci. Instr. – 1991. – Vol. 26. – P. 1840–1843.
5. Furukawa, T. Ferroelectric Properties of VDF Copolymers [Text] / T. Furukawa // Phase Transitions – 1989. – Vol. 18. – P. 143–211.
6. Giacometti, J. A. Corona Charging of Polymers: Recent Advances on Constant Current Charging [Text] / J. A. Giacometti, S. Fedosov, M. M. Costa. // Braz. J. Phys. – 1999. – Vol. 29, Issue 2. – P. 269–279.