

УДК 541.64:539.3

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРОВ

© 2006 г. А. П. Тютнев\*, Р. Ш. Ихсанов\*\*, Е. Л. Гринь\*, Г. П. Сафонов\*,  
А. И. Кононенко\*\*, А. М. Сорокин\*, И. В. Руденко\*\*

\*Федеральное государственное унитарное предприятие “Научно-производственное предприятие  
Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом им. А.Г. Иосифьяна”  
101000 Москва, Главпочтамт, а/я 496

\*\*Федеральное государственное унитарное предприятие “Научно-исследовательский институт приборов”  
140080 Лыткарино Московской обл., промзона Тураево, стр. 8

Поступила в редакцию 18.04.2006 г.

Принята в печать 19.05.2006 г.

Рассмотрена общая теория явления восстановленного напряжения в полимерах при представлении реального поляризационного процесса дискретным набором релаксаторов Дебая. Приведены примеры численного решения прямой и обратной задач. Предлагается использовать корреляционную связь между искусственно состаренными образцами полимера и кривыми восстановленного напряжения в них для оценки технического состояния полимера в реальных условиях эксплуатации. Показано, что для получения количественных оценок достаточно ограничиться анализом явления с тремя релаксационными процессами.

### ВВЕДЕНИЕ

При измерении восстановленного напряжения регистрируют разность потенциалов на электродах образца полимера, предварительно заряженного от источника постоянного напряжения и закороченного на определенный отрезок времени, после снятия закорачивающего шунта. Дело в том, что некоторые виды деформационной или ориентационной поляризации, вызывая поляризацию макромолекул полимера в приложенном электрическом поле, не успевают полностью деполяризоваться за время пребывания полимера в закороченном состоянии. Поэтому к моменту снятия закорачивающего шунта, хотя напряжение на обкладках закороченного образца равно нулю и, как следствие, наведенное электрическое поле в объеме полимера также равно нулю, в нем сохраняется остаточная поляризация, в точности скомпенсированная поверхностными свободными зарядами на электродах.

С течением времени, однако, поляризация начинает разрушаться за счет энергии теплового

движения, а компенсирующий свободный заряд по-прежнему сохраняется на электродах. Напряжение на образце начинает расти. Со временем оно было просто достигло определенного значения и в дальнейшем оставалось постоянным. Но из-за объемной проводимости происходит утечка зарядов с электродов. Одновременное протекание этих двух процессов приводит к тому, что восстановленное напряжение проходит через максимум, стремясь к нулю при больших временах.

Старение полимерной изоляции в процессе эксплуатации сопровождается изменением ее физико-химической структуры, образованием новых и исчезновением старых видов дипольной поляризации, что, несомненно, изменит вид кривой восстановленного напряжения, затрагивая не только амплитуду восстановленного напряжения, но и кинетику его установления и спада.

Если определить корреляционную связь между параметрами функции, описывающей кривую восстановленного напряжения и параметрами состояния полимера (которые можно изменять путем старения), то появляется возможность определения степени состаренности полимерной изо-

E-mail: aptutnev@yandex.ru (Тютнев Андрей Павлович).

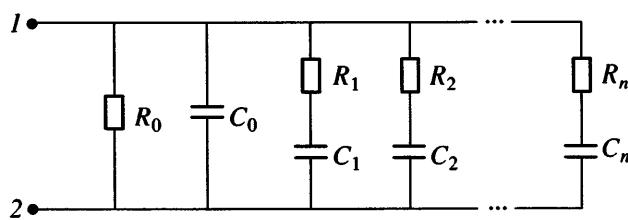


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения образца полимера.

ляции, т.е. ее технического состояния, в текущий момент времени. Более того, если известен закон старения и критическое состояние изоляции, соответствующее выходу ее из строя, то можно определить время достижения этого состояния, т.е. остаточный ресурс изоляции.

Цель настоящей работы – разработка физико-математической модели восстановленного напряжения, создание пакета программ численного решения задачи определения параметров модели по экспериментальным данным, выдача рекомендаций для построения методики определения текущего состояния и прогнозирования остаточного ресурса полимерной изоляции.

## ТЕОРИЯ ЯВЛЕНИЯ

Для проведения теоретического анализа воспользуемся часто используемым приближением, при котором реальный релаксационный спектр полимера заменяется дискретным набором релаксаторов Дебая [1–3]. Указанное приближение дает возможность провести дальнейший анализ в рамках теории линейных электрических цепей, представляя совокупность дебаевских релаксаторов соответствующей схемой замещения. В литературе известно несколько схем замещения [4]. В данной работе расчеты проведены по одной из них, справедливой для однородного диэлектрика (рис. 1), но, как станет ясно из последующего изложения, принятый подход с точки зрения анализа восстановленного напряжения универсален. Для более ясного изложения физической сущности изучаемого явления влиянием измерительной аппаратуры на экспериментальные результаты на данном этапе пренебрегаем, т.е. считаем, что внутреннее сопротивление источника напряжения, как и сопротивление закорачивающего шунта, равны нулю, а входное сопротивление вольтметра, наоборот, равно бесконечности.

Связь между микроскопическими характеристиками релаксаторов и параметрами схемы замещения удобно провести в терминах диэлектрической проницаемости, поскольку дальнейший переход к емкостям, а затем и сопротивлениям очевиден.

Итак, пусть относительная диэлектрическая проницаемость полимера на очень высоких частотах равна  $\epsilon_{\infty}$ , а статическая –  $\epsilon_{st}$ , так что декремент диэлектрической проницаемости составляет  $\Delta\epsilon = \epsilon_{st} - \epsilon_{\infty}$ . Именно эта часть диэлектрической проницаемости обусловлена наличием в полимере релаксационных процессов. В полярных полимерах  $\Delta\epsilon$  достигает 15–25%  $\epsilon_{st}$ , даже при комнатной температуре. В соответствии с принципом суммирования имеем

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \Delta\epsilon \int_0^{\infty} \frac{f(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau \quad (1)$$

Здесь  $\omega$  – круговая частота переменного поля, в котором измеряется диэлектрическая проницаемость полимера,  $f(\tau)$  – функция распределения релаксационных мод, причем  $\int_0^{\infty} f(\tau) d\tau = 1.0$ .

С другой стороны, плотность тока деполяризации в образце полимера, полностью заполяризованного в постоянном электрическом поле  $F_0$ , после снятия напряжения в момент времени  $t = 0$  описывается выражением

$$j(t) = \epsilon_0 \epsilon_{\infty} F_0 \delta(t) + \epsilon_0 \Delta\epsilon F_0 \int_0^{\infty} \frac{f(\tau)}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) d\tau, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\delta(t)$  – дельта-функция. Известно, что спад во времени тока деполяризации следует закону  $j(t) \propto t^{-n}$  при  $n$  приблизительно равном единице [2, 5–8]. Для выполнения этого условия необходимо потребовать, чтобы  $f(\tau) \propto \frac{1}{\tau}$ . В данном случае действительно

$j \propto \frac{1}{t}$ , но для обеспечения сходимости нормированного интеграла придется ограничить оба предела интегрирования, что полностью соответствует микроскопической картине поляризации.

Для проведения анализа явления восстановленного напряжения требуется решение системы

линейных дифференциальных уравнений. По этой причине необходимо ограничиться дискретным набором времен релаксации, причем целесообразно выбрать их равноотстоящими в логарифмической шкале (например, различающимися степенью десяти).

Приняты следующие обозначения:  $R_0$  – сопротивление образца на постоянном токе;  $C_0$  – геометрическая емкость образца, соответствующая диэлектрической проницаемости  $\epsilon_\infty$  ( $\tau_0 = R_0 C_0$ );  $R_i$ ,  $C_i$  и  $\tau_i = R_i C_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – сопротивление, емкость и постоянная времени  $i$ -й “поляризационной” цепочки;  $U_0$  – напряжение зарядки;  $t_c$  – время зарядки;  $t_d$  – время разрядки;  $U_r(t)$  – восстановленное напряжение.

В приведенных обозначениях спектр времен релаксации полимера представляется набором характерных времен релаксации  $\tau_i$  и их статистических весов  $f_i = C_i / \sum_{j=0}^n C_j$ . Параметры  $\tau_i$  и  $f_i$  являются уже характеристиками самого полимера и не зависят от вида образца, использованного в ходе измерений. Фактически речь идет о соответствующем частотном спектре ( $\omega_i = 2\pi/\tau_i$ ) относительной диэлектрической проницаемости полимера.

Выражения для напряжений на конденсаторах  $U_i(t)$ , а также восстановленного напряжения  $U_r(t)$  можно получить методами расчета переходных процессов в электрических цепях (см. например, работу [9]). Решение представляет собой сумму экспонент с постоянными параметрами  $A_j$  и  $\theta_j$  ( $j = 0, \dots, n$ )

$$U(t) = \sum_{j=0}^n A_j \exp\left(-\frac{t}{\theta_j}\right) \quad (3)$$

На этапах зарядки или разрядки  $\theta_i = \tau_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), но на этапе восстановления напряжения эти равенства нарушаются. Теперь для отыскания  $\theta_j$  необходимо решение алгебраического уравнения ( $n+1$ )-й степени, так называемого векового уравнения [9].

#### ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Имея в виду то, что на практике регистрация кривых восстановленного напряжения осуществляется в интервале времен  $0.1 - (2 \times 10^3)$  с, числен-

ное решение задачи проведено для дискретного спектра, состоящего из шести времен релаксации.

При выборе параметров эквивалентной схемы необходимо руководствоваться следующими физическими соображениями, вытекающими из общих положений физики полимеров.

В соответствии со сказанным выше об относительной величине декремента диэлектрической проницаемости получаем, что отношение  $\sum_{i=1}^6 C_i / \sum_{j=0}^6 C_j$  не должно превышать 20%.

Далее, для обеспечения гиперболического закона спада абсорбционного тока при временах релаксации  $\tau_i$ , различающихся ровно на порядок ( $\tau_{i+1} = 10\tau_i$ ), достаточно выбрать парциальные емкости  $C_i$  равными друг другу. Итак, принимаем, что  $\tau_1 = 0.01$ , а  $\tau_6 = 1000$  с. Кроме того,  $\tau_0 = 500$  с и  $\Delta\epsilon/\epsilon_{st} = 16.6\%$ . Для проведения численного счета использованы такие параметры схемы замещения:  $C_0 = 500$  нФ,  $C_i = 17$  нФ, сопротивления  $R_j$  соответствуют выбранным значениям  $\tau_i$  ( $j = 0 \dots 6$ ). Например,  $R_3 = 60$  МОм ( $\tau_3 = 1$  с).

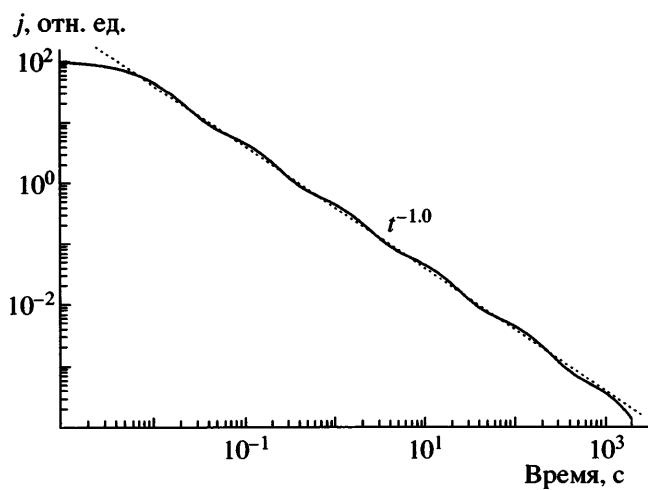
Согласно принятой схемы замещения, спад абсорбционного тока после полной зарядки всех конденсаторов до напряжения  $U_0$  может быть записан в виде, несколько отличном от выражения (2):

$$i_d(t) = U_0 C_0 \delta(t) + U_0 C_1 \sum_1^6 \frac{1}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (4)$$

поскольку все  $C_i$  равны друг другу. Фактически для  $t > 0$  ток абсорбции просто совпадает со вторым членом в правой части уравнения (4). Как следует из рис. 2, требуемый закон спада абсорбционного тока приблизительно выполняется в интервале времен 0.01–1000 с. Волнистый характер кривой обусловлен, естественно, дискретностью спектра времен релаксации.

Принято, что напряжение зарядки составляет 1000 В, время зарядки 6000 с, а время пребывания образца в закороченном состоянии 1 с.

Есть все основания надеяться на то, что полученные кривые как восстановленного напряжения, так и напряжений на отдельных конденсаторах эквивалентной схемы отображают все основ-

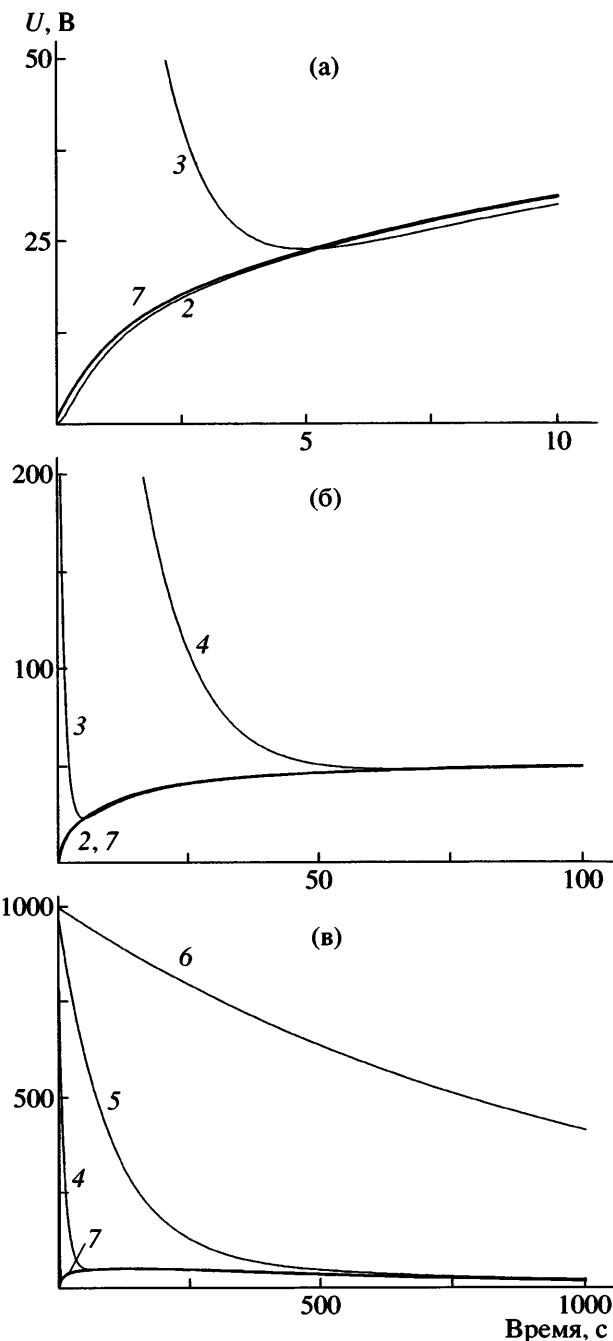


**Рис. 2.** Временная зависимость тока абсорбции после подачи напряжения на образец полимера в момент времени  $t = 0$  для схемы замещения с шестью релаксационными цепочками. Пояснения в тексте.

ные особенности изучаемого явления достаточно точно. Действительно, релаксационные процессы с меньшими постоянными времени просто полностью разряжаются за 1 с пребывания полимера в закороченном состоянии, а с много большими практически не только не заряжаются, но и не разряжаются за 1000 с измерения восстановленного напряжения. Поэтому вкладом тех и других можно пренебречь.

На рис. 3 приведены результаты расчета, соответствующие принятым значениям параметров анализируемой схемы. Видно, что быстрый начальный рост восстановленного напряжения (до 5 с) обеспечивается деполяризацией второго и третьего релаксационного процесса. Как и следовало ожидать, вклад первого релаксационного процесса вообще отсутствует, поскольку для него время разрядки  $t_d \gg \tau_1$ .

К пятидесяти секунде заканчивается разрядка четвертой поляризационной цепочки, к 500-й – пятой. К концу регистрации запасенный заряд шестого конденсатора снижается в 2 раза. Однако уже с момента времени 200 с (время достижения максимума восстановленного напряжения  $U_{r\max} \approx 50.7$  В) начинается спад  $U_r$  с постоянной времени, близкой к  $\tau_0$ . Заметим, что при отсутствии утечки ( $R_0 = \infty$ ) кривая восстановленного



**Рис. 3.** Изменение во времени напряжения на различных конденсаторах анализируемой схемы на этапе регистрации восстановленного напряжения (начало отсчета времени соответствует моменту снятия закорачивающего шунта) для различных интервалов времени наблюдения (а, б и в). Номера кривых соответствуют номерам релаксационных цепочек, 7 – кривая восстановленного напряжения.

напряжения имела бы вид монотонно нарастающей функции времени к своему предельному значению  $\sim 100$  В, достигаемому к моменту времени 10000 с.

Таким образом, за начальный рост восстановленного напряжения ответственны релаксаторы с характерными временами, составляющими 0.2– $50t_d$ , в то время как максимум напряжения формируется за счет релаксационных процессов с  $\tau$  порядка  $100t_d$  и объемной электропроводности полимера.

Для практики важное наблюдение состоит в том, что сокращение числа релаксационных процессов до трех с постоянными временем 1, 10 и 100 с соответственно практически не теряет точности описания кривой восстановленного напряжения (рис. 4). Видно, что если при малых временах и заметно некоторое расхождение результатов (не более 5% при  $t \geq 6$  с), то уже с 30-й секунды оно не превышает долей процента (вставка к рисунку). Это позволяет ограничиться тремя релаксационными процессами, что дает возможность использовать для расчетов существующие аналитические выражения. Типичное время расчета одного варианта с помощью стандартных математических пакетов занимает доли секунды. Именно этот подход и будет положен в основу развивающегося метода определения текущего состояния полимерной изоляции и прогнозирования ее остаточного ресурса.

В случае трех релаксационных процессов ( $n = 3$ ) характеристические времена  $\theta_i$  являются корнями следующего уравнения:

$$\begin{aligned} \tau_0 \theta [C_1(\theta - \tau_2)(\theta - \tau_3) + C_2(\theta - \tau_1)(\theta - \tau_3) + \\ + C_3(\theta - \tau_1)(\theta - \tau_2)] + \\ + C_0(\theta - \tau_0)(\theta - \tau_1)(\theta - \tau_2)(\theta - \tau_3) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Дальнейшая процедура нахождения искомых решений подробно изложена в литературе [9] и здесь не приводится.

До сих пор изложение проводилось для идеального случая, когда входное сопротивление вольтметра  $r$  принималось равным бесконечности. В действительности оно конечно, и его влияние должно учитываться. Резисторы  $r$  и  $R_0$  включены в цепь параллельно, так что первое из них шунтирует второе. При проведении измерений восстановленного напряжения следует добиваться выполнения условия  $r \geq 10R_0$ , означающего, что внутреннее сопротивление измерительной схемы, регистрирующей  $U_d(t)$ , должно быть много больше сопротивления диэлектрика на постоян-

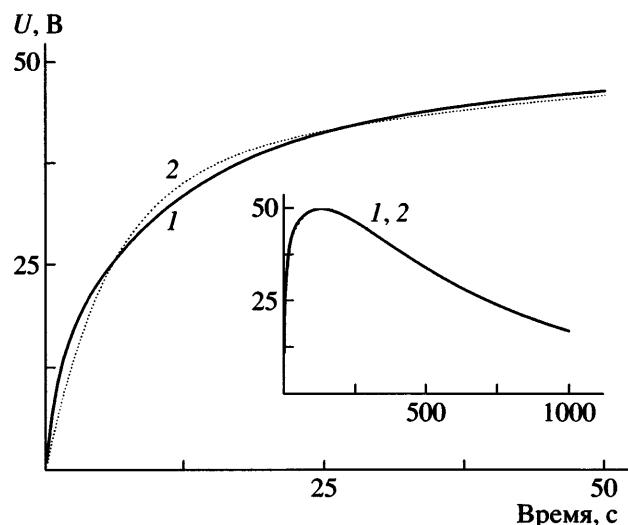


Рис. 4. Аппроксимация кривой восстановленного напряжения (сплошная линия 1), приведенной ранее на рис. 3 (кривая 7), подгонкой кривой (2), полученной в схеме замещения с тремя релаксационными цепочками (на вставке в полном интервале времен наблюдения).

ном токе. В противном случае информация относительно релаксационного спектра в части медленных релаксационных процессов будет потеряна.

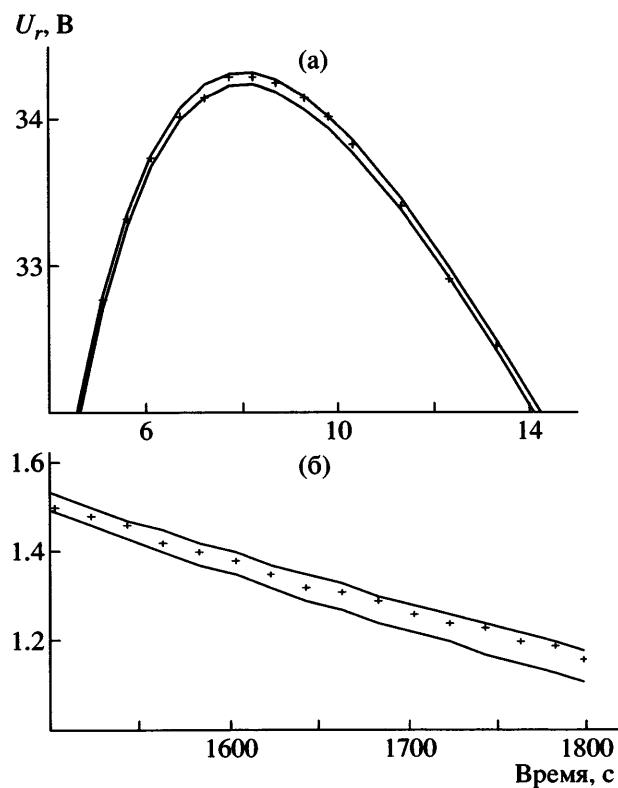
#### МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ. ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В основу решения обратной задачи положен метод подгонки функции вида (1) к экспериментальной кривой восстановленного напряжения. Для этого можно воспользоваться каким-либо пакетом регрессионного анализа; например, в данной работе использовался пакет FITTER [10]. Для начала итерационной процедуры в FITTER требуется начальное приближение к оптимизируемым параметрам, которое можно найти, например, методом, описанным в работе [11]. Для аппроксимации использовался метод наименьших квадратов.

Рисунок 5 иллюстрируют точность подобной аппроксимационной процедуры на примере экспериментальных данных, полученных для ПВХ-изоляции силового кабеля.

#### СТАРЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Старение полимерной изоляции в процессе ее эксплуатации сопровождается изменением ее фи-



**Рис. 5.** Результаты аппроксимации начального (а) и конечного (б) участков экспериментальной кривой восстановленного напряжения (+) зависимостью вида (3) (сплошные линии). Коридор рассчитан на уровне достоверности 0.95 и составляет  $\pm 0.3$  (а) и  $\pm 3\%$  (б).

зико-химической структуры, образованием новых и исчезновением старых видов дипольной поляризации [12, 13]. Анализ условий эксплуатации электрооборудования с учетом кинетики деструкции связей, ответственных за изменение свойств разработанных материалов, свидетельствует о преобладании гидролизного механизма их старения. На это указывают экспериментальные данные, полученные при исследовании гидролиза пленок и композиционных материалов на их основе. Повышение гидролитической стойкости пленок, как правило, позволяет изделию выдержать более высокие рабочие температуры и повышенную концентрацию влаги и, таким образом, достигнуть большего ресурса.

При рассмотрении возможных химических процессов, происходящих при старении низковольтной изоляции, можно выделить три основные реакции: термическое разложение, термоокислительную деструкцию и гидролиз. В случае эксплуатации современного серийного оборудо-

вания, когда температура изменяется от 130 до 180°C в условиях контакта с атмосферой, термическим разложением можно пренебречь, так как его скорость мала из-за значительной энергии тепловой диссоциации (200–500 кДж/моль) разрушающихся химических связей полимерных диэлектриков. Энергетические барьеры для термоокислительной деструкции и гидролиза в 2–6 раз меньше, чем для термического разложения.

Следовательно, скорость этих процессов значительно больше, и их протекание при старении изоляции наиболее вероятно. Например, для полиамида энергия барьера снижается от 240 (в случае термического разложения) до 120–180 кДж/моль (в случае гидролиза) с предэкспонентой  $k_0 \approx 10^5 \text{ с}^{-1}$  [13].

При сравнении вкладов термоокислительной деструкции и гидролиза в процесс старения следует учесть, что энергия активации гидролиза несколько меньше, а предэкспонента больше на 2–3 порядка [14]. Следовательно, константа скорости реакции гидролиза, а значит, и скорость намного больше, чем константа скорости термоокислительной деструкции. Следует учесть также, что растворимость кислорода, например в ПЭТФ (одном из наиболее распространенных в настоящее время электроизоляционных материалов), в нормальных условиях составляет 0.01–0.02%, а воды 0.2–0.5% [15]. Можно предположить, что в реальных условиях ответственным за процесс старения изоляции является гидролиз. Об этом же свидетельствует анализ значений энергий активации, ответственных за процесс старения, которые получены для 170 электроизоляционных материалов из зависимости срока службы от температуры. Установлено, что для большинства из них указанные величины составляют 70–80 кДж/моль [16], что близко к энергии активации гидролиза функциональных групп исследуемых полимерных материалов. Иными словами, изучение закономерностей гидролитической стойкости используемых пленочных полимерных диэлектриков весьма актуально. Следует отметить также, что воздействие воды на пленки сводится не только к их химическим изменениям, но и к различным структурным превращениям, в том числе к изменению степени кристалличности [17], что в ряде случаев существенно ухудшает физико-механические свойства пленок.

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В ходе ускоренных испытаний по старению получают зависимость параметра, отражающего техническое состояние полимера, от времени. Путем решения обратной задачи находят параметры  $\{A_i, \theta_i\}$ , характеризующие данное изделие в текущем техническом состоянии. Таким образом, устанавливается прямая корреляционная зависимость техническое состояние изделия—набор параметров  $\{A_i, \theta_i\}$ .

Если известен закон старения изделия, то, определив текущее состояние изделия по набору параметров  $\{A_i, \theta_i\}$ , можно установить остаточный ресурс изоляции. Предложенный выше подход значительно расширяет возможности метода возвратного напряжения по сравнению с однопараметрическим или двухпараметрическим описанием, рассмотренным ранее в литературе [18–20].

Проведенные нами экспериментальные исследования для поливинилхлоридного пластика двумя методами (по десорбции пластификатора до порогового минимального значения, в качестве которого используется дибутилфталат и по зависимости параметров восстановленного напряжения от времени) показывают хорошее совпадение результатов, свидетельствующее о том, что в нормальных условиях он может использоваться в электрооборудовании не менее 40 лет.

Авторы выражают благодарность А.А. Голдобенкову за постоянный интерес к работе и А.С. Воробьеву за полезное обсуждение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубовицкий В.А., Иржак В.И. // Высокомолек. соед. Б. 2005. Т. 47. № 1. С. 121.
2. Электрические свойства полимеров / Под ред. Сажина Б.И. Л.: Химия, 1977.
3. Бартенев Г.М., Бартенева А.Г. Релаксационные свойства полимеров. М.: Химия, 1992.
4. Беленький Б.П., Бондаренко П.Н., Борисова М.Э., Койков С.Н., Мезенин Д.Л. Расчет эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов. М.: Радио и связь, 1988.
5. Лущейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров. М.: Химия, 1988.
6. Wintle H.J. // J. Non-Cryst. Solids. 1974. V. 15. P. 471.
7. Hanscomb J.R., Calderwood J.H. // J. Phys., Appl. Phys. 1973. V. 6. P. 1093.
8. Das Gupta D.K., Joyner K. // J. Phys., Appl. Phys. 1976. V. 9. P. 829.
9. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1966. Ч. 1.
10. Bystritskaya E.V., Pomerantsev A.L., Rodionova O.Ye. // J. Chemometrics. 2000. V. 14. P. 667.
11. Арушунян О.Б., Залеткин С.Ф. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране. М.: МГУ, 1990.
12. Сафонов Г.П., Энтелис С.Г., Ольхова Ю.А. // Высокомолек. соед. А. 1975. Т. 17. № 2. С. 343.
13. Берштейн В.А. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1979. С. 152.
14. Шляпников Ю.А., Кирюшкин С.Г., Марвин А.П. Антиокислительная стабилизация полимеров. М.: Химия, 1986.
15. Mouseev Ю.В., Заиков Г.Е. // Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах. М.: Химия, 1979.
16. Dixan R.R. // IEEE Trans. Electr. Insul. 1980. V. 15. № 4. P. 333.
17. Кочервинский В.В., Ромадин В.Ф., Зеленев Ю.В. // Высокомолек. соед. А. 1977. Т. 19. № 11. С. 2593.
18. Серебряков А.С. // Локомотив. 2001. № 6. С. 534.
19. Кононенко А.И., Циканин А.Г., Протасов С.И., Богданов О.В., Ихсанов Р.Ш. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. М.: ЦНИИатоминформ, 2002. Вып. 3. С. 98.
20. Пантелейев Ю.А. // Электротехника. 2003. № 4. С. 42.

## Recovered-Voltage Phenomenon and Prospects for Its Use for Assessment of the Condition of Polymers

A. P. Tyutnev<sup>a</sup>, R. Sh. Ikhсанов<sup>b</sup>, E. L. Grin<sup>a</sup>, G. P. Safonov<sup>a</sup>,  
A. I. Kononenko<sup>b</sup>, A. M. Sorokin<sup>a</sup>, and I. V. Rudenko<sup>b</sup>

<sup>a</sup> NPO All-Russia Institute of Electromechanics and Iosif yan Plant,  
al/ya 496, Moscow, 101000, Russia

<sup>b</sup> Research Institute of Instrumentation,  
promzona Turaevo, Lytkarino, Moscow oblast, 140080, Russia  
e-mail: aptyutnev @yandex.ru

**Abstract**—A general theory of the phenomenon of recovered (residual) voltage in polymers was considered on the basis of representation of an actual poling process by a discrete set of Debye relaxators. Examples of numerical solution of the direct and inverse problems are given. A correlation expression between intentionally aged polymer specimens and residual-voltage curves was proposed for use in the assessment of the material state of a polymer under actual service conditions. It was shown that it is sufficient to restrict consideration to three relaxation processes in analysis of the phenomenon.