

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (05.09.02)

УДК 621.314.212

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-54-61

Измерение степени полимеризации полимерных материалов изоляционной системы высоковольтного оборудования

В.А. Чернышев, Е.В. Зенова

Использование величины степени полимеризации (СП) полимерных материалов в качестве параметра, оценивающего состояние изоляционной системы энергетического оборудования в целом, выделяет проблему измерения СП в ряду особо значимых и актуальных. Возможность использования значения СП в качестве параметра оценивания состояния энергетического оборудования, находящегося длительное время в эксплуатации, также привлекает внимание специалистов.

Более интересны в этом случае методы измерения спектров токов диэлектрической абсорбции, позволяющие на практике контролировать величину степени поляризации полимерных материалов. В их основе лежат представления о движении заряженной частицы, как движения стоксовского тела в диэлектрической среде с вязкостью $\eta_{\text{уд}}$ под действием постоянно приложенного электрического поля. Для этого в анализируемом способе контролируется проводимость сформированной специальным образом двухслойной диэлектрической среды. Один слой представляет собой образец контролируемого материала, а второй слой, плотно контактирующий с первым, — материал, вязкость которого известна или может быть легко измерена доступными методами, как в случае жидкого диэлектрика.

Предложенный в работе способ определения СП органических диэлектрических материалов с помощью измерения спектра токов диэлектрической абсорбции по существу контролирует вязкость диэлектрической среды. Именно она определяет характер движения заряженной частицы в диэлектрике, а, следовательно, и характерные черты спектра токов диэлектрической абсорбции в контролируемом изоляционном промежутке. Четкость физических принципов, положенных в основу предложенного метода оценки степени полимеризации, коммерческая доступность аппаратного его оформления, наличие удобного для работы программного обеспечения, простота интерпретации и анализа получаемых результатов делают данный метод, в значительной степени, методом, расширяющим существующий инструментарий оценки состояния изоляционной системы и определения величины оставшегося ресурса времени жизни эксплуатируемого энергетического оборудования.

Ключевые слова: степень полимеризации, спектр токов диэлектрической абсорбции, вязкость диэлектрической среды, оценка состояния, изоляционная система, время жизни.

Для цитирования: Чернышев В.А., Зенова Е.В. Измерение степени полимеризации полимерных материалов изоляционной системы высоковольтного оборудования // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 54—61. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-54-61.

Measuring the Polymerization Degree of Polymer Materials Used in the High-Voltage Equipment Insulation System

V.A. Chernyshev, E.V. Zenova

The use of polymeric materials polymerization degree (PD) as a parameter from which the state of power equipment insulation system as a whole is estimated imparts much importance and significance to the PD measurement problem. The possibility of using the PD value as a parameter for estimating the state of power equipment items that have been in operation for a long time also attracts the attention of specialists. In this regard, practical methods for measuring the spectrum of dielectric absorption currents, which make it possible to monitor the polymeric material polarization degree, are of special interest. These methods are based on the theoretical concepts about the motion of a charged particle as a Stokes body in dielectric medium with specific viscosity η_{sp} under the effect of a constantly applied electric field. To this end, the conductivity of a specially formed two-layer dielectric medium is monitored in the method being analyzed. One of these layers is a sample of the material being

monitored, and the second one, which is in close contact with the first one, is a material the viscosity of which is known or can be easily measured using accessible methods, as in the case of a liquid dielectric. The proposed method for determining the PD of organic dielectric materials by measuring the spectrum of dielectric absorption currents is essentially a dielectric medium viscosity monitoring technique. It is exactly this parameter that governs the charged particle motion pattern in a dielectric and, hence, the characteristic features of the spectrum of dielectric absorption currents in the insulation gap being monitored. Owing to the clear physical principles laid down in the proposed method for estimating the polymerization degree, commercial availability of the equipment for its implementation, the availability of user-friendly software, and the simplicity of interpretation and analysis of the obtained results, the new method significantly extends the existing tools for assessing the insulation system state and determining the remained lifetime of operating power equipment.

Key words: polymerization degree, spectrum of dielectric absorption currents, dielectric medium viscosity, state estimation, insulation system, lifetime.

For citation: Chernyshev V.A., Zenova E.V. Measuring the Polymerization Degree of Polymer Materials Used in the High-Voltage Equipment Insulation System. Bulletin of MPEI. 2019;3:54—61. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-54-61.

Введение

Проблема измерения величины молекулярного веса полимерных диэлектрических материалов в настоящее время все еще значима и актуальна. Несмотря на большое количество методов измерения величины молекулярного веса (степени полимеризации (СП)) полимерного диэлектрика важность проблемы со временем только возрастает [1—4]. Это связано с тем, что величина степени полимеризации перестает быть только характеристикой полимерных диэлектриков, определяющей свойства и возможность их практического применения, но и приобретает свойства диагностического параметра. Так, практика эксплуатации высоковольтного энергетического оборудования непосредственно связана с решением проблемы оценки состояния сложного технического устройства при заданном уровне надежности [5]. При этом следует понимать, что изоляционная конструкция оборудования, работающая в сложных эксплуатационных условиях, находится в электрическом поле высокой напряженности длительное время. Структура, свойства и возможность дальнейшей работы диэлектрической конструкции представляются сложными функциями времени жизни энергетического оборудования в целом. В этих условиях величина степени полимеризации работающего диэлектрического материала считается эффективным параметром оценивания состояния эксплуатируемого оборудования, что делает техническое обслуживание его достаточно обоснованным и экономически целесообразным [1].

Известные способы измерения степени полимеризации [2, 6, 7] полимерных материалов основаны на определении величины среднечисленной молекулярной массы путем измерения коллигативных свойств, зависящих от количества частиц вещества, находящихся в растворе. К параметрам, контролируемым опытным путем, относятся величина характеристической вязкости $|\eta|$ раствора полимера в специальных растворителях, величины коэффициентов седиментации S и диффузии D . Для вычисления величины молекулярной массы используются эмпирические соотношения типа соотношения Марка–Куна–Хаувенка [8]:

$$\begin{cases} a : |\eta| = K_{\eta} M^a; \\ b : S = K_S M^{1-b}; \\ c : D = K_D M^{-b}, \end{cases} \quad (1)$$

где K_{η} , K_S , K_D , a , b — эмпирические константы, величина которых зависит от конформации и конфигурации макромолекул в растворе; M — величина молекулярного веса, выраженного в атомных единицах массы (а.е.м.) или дальтонах.

Основным недостатком этих методов является то, что контролируемые на опыте параметры определяются не в изучаемых полимерных средах, а в их сильно разбавленных растворах. Влияние межмолекулярного взаимодействия, существенно меняющего величины параметров, приходится учитывать с помощью эмпирически полученных констант K_{η} , K_S , K_D , что не может не сказаться на трудоемкости методов и точности определения степени полимеризации. Причиной тому является зависимость коллигативных свойств вещества от общего числа частиц в растворе, а не от их размера. В результате величина среднечисленной молекулярной массы очень чувствительна к присутствию низкомолекулярных частиц. Чтобы уменьшить влияние указанных факторов или избежать их вообще, используют методы криоскопии (по температуре замерзания), эбуллиоскопии (по температуре кипения) осмометрии (осмометрическому давлению) и др., т. е. во всех этих методах работает эффект изменения вязкости раствора под действием влияющих факторов (например, температуры).

Способы определения средней степени полимеризации сводятся к растворению образца испытуемого материала в специально подобранных растворителях с последующим измерением вязкости $|\eta|$ с помощью вискозиметра Уббелюде [8]. Затем, используя специальные таблицы [6] или эмпирические соотношения, вычисляют величину молекулярной массы (СП) полимера:

$$СП = (2000\eta_{уд})/C(1+0,29\eta_{уд}),$$

где $\eta_{уд}$ — удельная вязкость, $\eta_{уд} = (t_1/t_0) - 1$; t_1 , t_0 — время истечения раствора и растворителя, с; C — концентрация целлюлозы в растворе, г/л [9].

При всем своем многообразии все методы данного типа имеют очевидные недостатки, к которым относятся: низкие воспроизводимость и повторяемость результатов измерения, невозможность сопоставления результатов измерения СП, проведенных в разных лабораториях, низкая достоверность. К тому же существующие методы оценки вязкости исключают возможность использовать величину СП в качестве параметра, оценивающего состояние эксплуатируемого устройства, поскольку очень трудно организовать отбор пробы изоляционного материала, работающего на самых напряженных участках электрического поля.

Измерение величины степени полимеризации работающего полимерного диэлектрика

Использование величины СП в качестве параметра оценивания состояния эксплуатируемого оборудования предполагает наличие надежного метода измерения значения СП полимерного материала, формирующего изоляционную систему устройства, непосредственно на месте его эксплуатации, не нарушая при этом конструкционного совершенства контролируемого изделия в целом [10, 11].

Огромными возможностями в этом случае обладают методы измерения спектров токов диэлектрической абсорбции [5, 12—14], позволяющие на практике контролировать величину степени поляризации полимерных материалов. В основе методов лежит представление о движении зараженной частицы как движении стоксовского тела в диэлектрической среде с вязкостью $\eta_{\text{уд}}$ под действием постоянно приложенного электрического поля. Для этого в рассматриваемом способе контролируется проводимость сформированной специальным образом двухслойной диэлектрической среды. Один слой представляет собой образец контролируемого материала, а второй, плотно контактирующий с первым, — материал, вязкость которого известна или может быть легко измерена доступными методами, как в случае жидкого диэлектрика [15].

Изменение тока, протекающего в двухслойной диэлектрической среде (двухслойном конденсаторе Максвелла), во времени описывается соотношением:

$$i(t) = A \left(1 + B e^{-t/\tau} \right),$$

где A, B — константы при заданных условиях проводимого эксперимента; τ — время релаксации процесса установления структурной поляризации, величина которого определяется электрическими параметрами слоев (R_r, C_r), формирующих диэлектрическую среду изоляционного промежутка.

Поскольку в общем случае величина протекающего тока задается соотношением $J = nqv$, в котором скорость движения заряженной частицы v пропорциональна напряженности электрического поля E ($v = \mu E$), то величины токов в каждом слое равны:

$$I_1 = nq\mu_1 E_1; \quad I_2 = nq\mu_2 E_2,$$

где n — количество носителей электрического заряда, проходящее через границу раздела в единицу времени; q — величина заряда; μ — подвижность носителей электрического заряда; E_1, E_2 — напряженности электрического поля в контактирующих слоях диэлектрической среды (рис. 1).

В установившемся режиме I_1, I_2 представляют собой один и тот же ток, что позволяет записать следующее соотношение:

$$\mu_1 E_1 = \mu_2 E_2. \quad (2)$$

Понимая движение электрического заряда в диэлектрических слоях как движение стоксовского тела в вязкой среде под действием постоянно приложенной силы, полагаем, что $\mu = \text{const}/\eta$ [16]. Следовательно, запишем уравнение (2) в более удобной форме:

$$\eta_x = \frac{E_2}{E_1} \eta_1,$$

где η_x, η_1 — вязкости оцениваемого материала и контактирующего с ним диэлектрического слоя, величина которого известна.

Величина скачка напряженности электрического поля E_2/E_1 на границе контактирующих сред определяется плотностью электрического заряда, накопленного на границе за счет протекания структурной поляризации. Величина заряда, как интегральная характери-

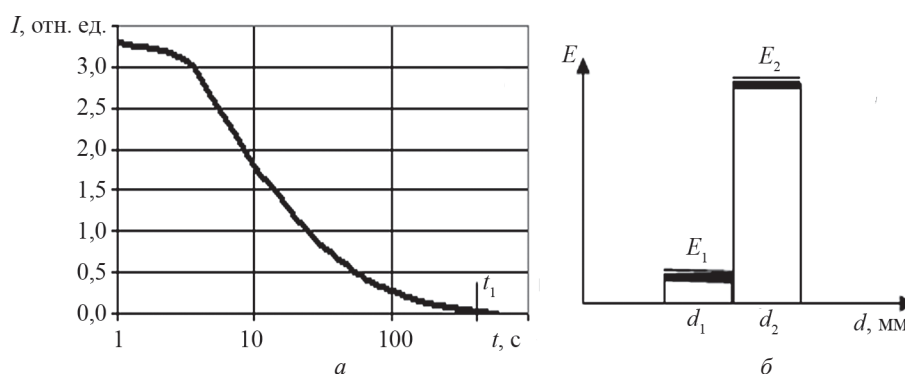


Рис. 1. Зависимость $I(t)$ в двухслойной диэлектрической среде (а) и распределение напряженности электрического поля в ней (б)

стика изменения плотности абсорбционного тока во времени $I_{\text{abc}}(t)$, непосредственно определяется параметрами, характеризующими интенсивность структурной поляризации и, в первую очередь, обобщенным индексом поляризации — tpi (total index polarization):

$$E_2/E_1 = \text{const}tpi.$$

На рис. 2 представлены изменения вида зависимости $I(t)$ и величины ее максимума $tpi = [I(t)]_{\text{max}}$ при увеличении вязкости η_1 примерно в 1,5 раза. Видно, что tpi уменьшилась практически пропорционально изменению η_1 .

Для достижения конечной цели, т.е. определения искомой величины СП, можно воспользоваться таблицами, приведенными в существующих нормативных документах, или эмпирическими соотношениями типа (1). Однако на практике для исключения выполнения всех промежуточных операций, связанных с определением усредненного значения вязкости исследуемого образца полимерного материала, предлагается пользоваться эмпирически установленным соотношением [15]:

$$DP_v = Atpi^n, \quad (3)$$

раскрывающим связь искомой величины степени полимеризации с измеренной опытным путем величиной обобщенного индекса полимеризации tpi .

Отличительной особенностью представленного способа измерения степени полимеризации полимерных материалов является возможность непосредственного контроля исследуемого объекта, а не его сильно разбавленного раствора. Измеренная при этом проводимость сопоставляется с проводимостью аналогичного полимерного образца с известной вязкостью η_1 (молекулярным весом), играющего роль базы сравнения, свойства которого известны с требуемой точностью.

Результаты оценки величины степени полимеризации и их обсуждение

Представленный способ измерения величины СП эффективен при измерении степени полимеризации

целлюлозы, входящей в состав твердой компоненты изоляционной системы силового масла наполненного трансформатора высокого класса напряжения (110 кВ и выше). По своей структуре изоляционные промежутки в подобных трансформаторах представляют собой двухслойные изоляционные системы [14]. Одним из таких слоев является изоляционная бумага (картон и пр.), в состав которой входит целлюлоза, определяющая механическую устойчивость изоляционной системы. Второй слой — трансформаторное масло, играющее роли не только изоляции, но и охлаждающей среды.

Изображенный на рис. 3 спектр токов диэлектрической абсорбции изоляционного промежутка трансформатора, проработавшего в распределительной сети более 37 лет, легко разлагается на два максимума, каждый из которых характеризует работоспособность изоляционного промежутка. Высота и место локализации основного максимума спектра свидетельствуют о четкости границы раздела диэлектрических сред и степени устойчивости к действующим нагрузкам материалов, работающих в контролируемом промежутке. Величина степени полимеризации твердой изоляции, рассчитанная по (3) при $A = 200$, $n = 0,251$, не превышает $DP = 385,4$. Величина оставшегося ресурса времени эксплуатации (времени жизни) — не менее 17 лет.

Высота и область локализации второго максимума характеризуют степень нарушенности структуры материалов изоляционного промежутка, значение которой достигает 40...45%. В дополнение к этому удается, используя возможности треугольника состояний (рис. 4), определить вид дефектов, развивающихся в объеме изоляционного промежутка [4]. Согласно приведенному на рис. 4 треугольнику возможных состояний основным видом старения является термическое старение при наличии вполне заметной разрядной активности контролируемого промежутка. Каждой области, расположенной внутри треугольника, соответствует определенный механизм старения (вид развивающегося во времени дефекта) или некоторая их совокупность.

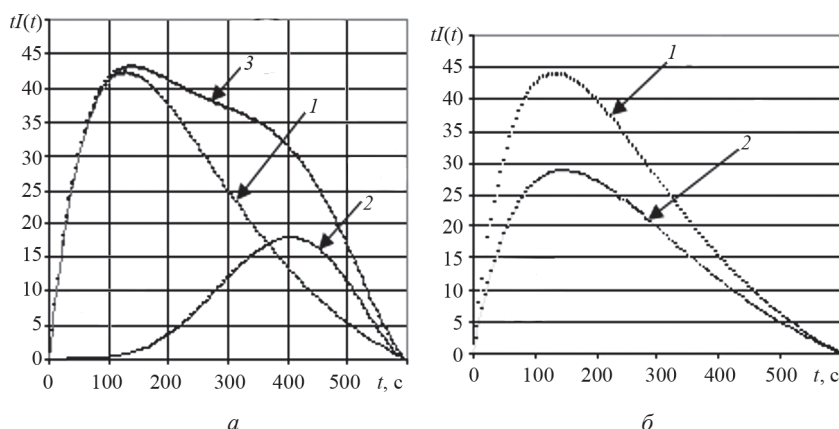


Рис. 2. Общий вид спектра поляризации двухслойной диэлектрической среды 3 и отдельных его полос 1 и 2 (а) и изменение амплитуды полос 1, 2 при увеличении вязкости η_1 в 1,5 раза (б)

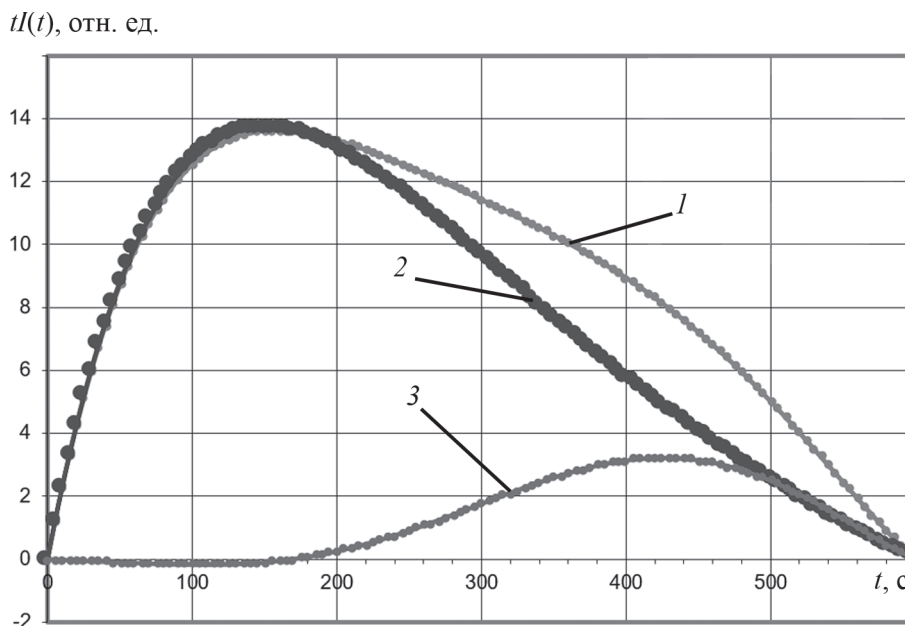


Рис. 3. Спектр токов диэлектрической абсорбции изоляционного промежутка ВН-СН, НН, Бак и основные компоненты его разложения для трансформатора марки ТДТН- 40000/110 (п/с. Вязьма-1, 2011 г.):

1 — ряд 4; 2 — ряд 6; 3 — ряд 7

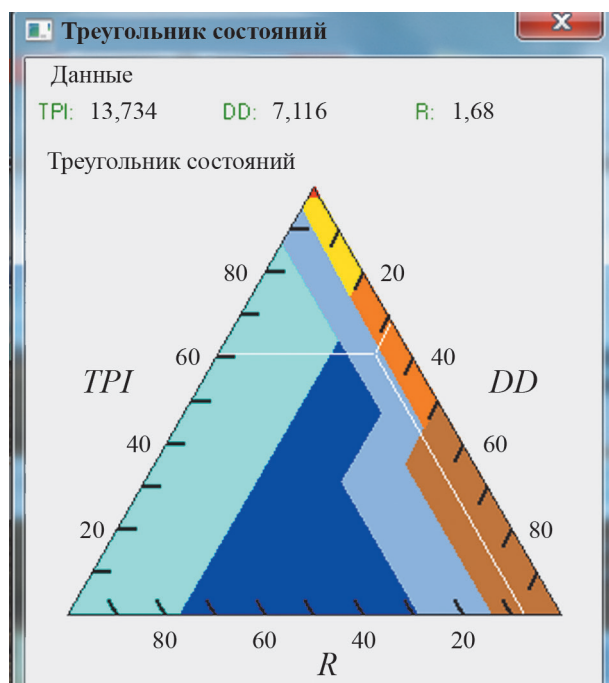


Рис. 4. Треугольник возможных состояний изоляционного промежутка

Использование метода построения спектра токов диэлектрической абсорбции [12] позволяет получить и другую полезную информацию о состоянии изоляционной системы. Будучи дополненной результатами оценки степени полимеризации, получаемая информация обеспечивает достоверность и практическую полезность формируемого заключения о состоянии изоляционной системы силового трансформатора в целом. Примером

тому служат результаты оценки состояния основных изоляционных промежутков исследованного трансформатора Т1 п/с Вязьма-1, приведенные в таблице.

Особенностью значений параметров таблицы являются их физическая природа и практическое значение, что позволяет разделить весь массив данных на три самостоятельные группы. Первая группа характеризует свойства материалов. Это величина активного сопротивления $R_{из}$, емкость изоляционного промежутка $C_{из}$, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и др. Хотя значения данных параметров и не определяют качество и долговечность изделия в целом, они позволяют получить информацию о функциональной пригодности изоляционной конструкции.

Ко второй группе относят параметры, являющиеся характеристиками процессов, протекающих в изоляционных материалах при эксплуатации электротехнического устройства: коэффициенты диэлектрических абсорбции DAR и разряда DD , индекс поляризации PI , обобщенный индекс поляризации tpi , интенсивность разрядной активности σ и др. По своей физической природе они, прежде всего, определяют реакцию диэлектрической среды и устойчивость ее к действию эксплуатационных нагрузок, а также длительность и надежность работы изоляционной конструкции во времени.

Третью группу составляют параметры, формирующие экспертное заключение о состоянии изоляционной системы и определяющие его достоверность и физическую обоснованность. Именно значения этих параметров лежат в основе рекомендаций и корректирующих мероприятий, обеспечивающих устойчивую

Результаты оценки состояния изоляционной системы трансформатора Т1 п/с Вязьма (2011 г.)

Параметры контроля	[ВН-СН, НН, БАК]	[СН-ВН, НН, БАК]	[НН-ВН, СН, БАК]	[ВН, СН, НН, БАК]
Сопротивление промежутка $R_{из}$, ГОм	1,680	1,174	1,143	1,337
Коэффициент диэлектрической абсорбции DAR	1,063	1,079	1,126	1,079
Индекс поляризации PI	1,184	1,199	1,247	1,230
Коэффициент диэлектрического разряда DD	7,116	7,365	8,788	11,76
Обобщенный индекс поляризации TPI	13,64	14,15	16,12	14,27
Среднеквадратичная плотность тока разряда σ , нА	6,924	2,117	1,128	6,994
Степень соответствия назначенному лидеру k	0,716	0,720	0,836	0,992
Увлажненность материалов W , %	~2,95	~2,93	~2,87	~2,85
Время жизни Δt , лет	17,11	17,61	19,43	17,74
Степень полимеризации целлюлозы DP	385,4	388,9	401,9	189,7
Вероятность отказа F	0,37	0,35	0,29	0,85

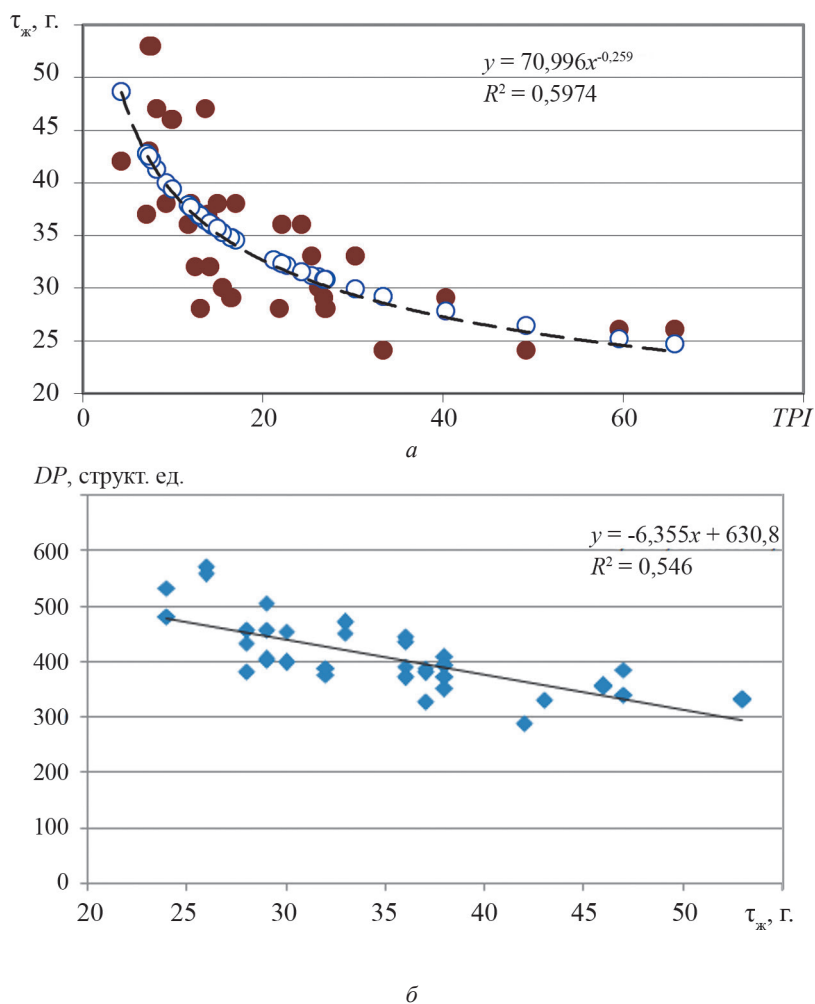


Рис. 5. Результаты многолетних наблюдений:

a — зависимость $t_{pi} = f(\tau_{ж})$; b — зависимость, представленная в виде регрессионного соотношения $DP = 200t_{pi}^{0,251}$

и надежную работу изоляционной конструкции на требуемом временном отрезке (эффективность технического обслуживания эксплуатируемого оборудования). К данным параметрам относят влажность твердой изоляции W ; температуру горячей точки T_g ; степень полимеризации целлюлозы DP ; уровень соответствия спектра токов диэлектрической абсорбции контролируемого промежутка спектру промежутка, выбранного в качестве аналога (назначенного лидера k); величину ресурса оставшегося время эксплуатации $\tau_{ж}$ и т. д.

Значения параметров данной группы, как правило, находят с помощью регрессионных соотношений. Существующая в настоящее время система регрессионных соотношений формализует накопленный опыт эксплуатации подобного типа оборудования и служит, согласно базифункциональной концепции, базой сравнения при количественной оценке состояния изоляционного промежутка. В настоящем случае регрессионное соотношение (3) получило еще и достаточно строгое обоснование, поскольку накопленный с годами опыт, представленный в виде зависимости $tpi = f(\tau_{ж})$ (рис. 5, а), удалось представить в виде регрессионного соотношения типа $DP = 200tpi^{0,251}$ (рис. 5, б).

Таким образом, регрессионное соотношение $tpi = f(\tau_{ж})$ получило строгое физическое обоснование, а

формируемое на его основе заключение о состоянии изоляционного промежутка — достоверность.

Заключение

Степень полимеризации полимерных диэлектрических сред, определяющая их свойства и область применения, используется в настоящее время как эффективный параметр контроля и управления временем жизни работающего длительного время энергетического оборудования. Поэтому разработка методов контроля степени полимеризации, легко внедряемых в систему технического обслуживания, приобретает особую актуальность и практическую значимость.

Предложенный способ определения степени полимеризации органических диэлектрических материалов с помощью измерения спектра токов диэлектрической абсорбции контролирует вязкость диэлектрической среды. Согласно эмпирическому правилу Вальдена–Писаржевского ($\gamma\eta = \text{const}$ при заданных условиях эксперимента, где γ — проводимость диэлектрической среды; η — величина ее вязкости) именно вязкость определяет характер движения заряженной частицы в диэлектрике, а, следовательно, и характерные черты спектра токов диэлектрической абсорбции в контролируемом изоляционном промежутке.

Литература

1. Krause Ch., Dreier L., Fehlmann A., Cross J. The Degree of Polymerization of Cellulosic Insulation: Review of Measuring Technologies and its Significance on Equipment // Proc. Electrical Insulation Conf. 2014. Pp. 267—271.
2. Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров. М.: Мир, 1983.
3. Jiefeng Liu e. a. Comparative Investigation on the Performance of Modified System Poles and Traditional System Poles Obtained from PDC Data for Diagnosing the Ageing Condition of Transformer Polymer Insulation Materials // Polymers. 2018. V. 10 (2). Pp. 191—207.
4. Saha T.K. Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2003. V. 10. Pp. 903—917.
5. Koch M.; Prevost T. Analysis of Dielectric Response Measurements for Condition Assessment of Oil-paper Transformer Insulation // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. V. 19. Pp. 1908—1915.
6. ГОСТ 25438—82. Целлюлоза для химической переработки. Методы определения характеристической вязкости.
7. ASTM D-4243. Standard Test Method for Measurement of Average Viscometric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers and Boards.
8. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия. 1974. Т. 2. С. 284.

References

1. Krause Ch., Dreier L., Fehlmann A., Cross J. The Degree of Polymerization of Cellulosic Insulation: Review of Measuring Technologies and its Significance on Equipment. Proc. Electrical Insulation Conf. 2014:267—271.
2. Rabek Ya. Eksperimental'nye Metody v Khimii Polimerov. M.: Mir, 1983. (in Russian).
3. Jiefeng Liu e. a. Comparative Investigation on the Performance of Modified System Poles and Traditional System Poles Obtained from PDC Data for Diagnosing the Ageing Condition of Transformer Polymer Insulation Materials. Polymers. 2018;10 (2):191—207.
4. Saha T.K. Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2003;10:903—917.
5. Koch M.; Prevost T. Analysis of Dielectric Response Measurements for Condition Assessment of Oil-paper Transformer Insulation. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012;19:1908—1915.
6. GOST 25438—82. Cellyuloza dlya Khimicheskoy Pererabotki. Metody Opredeleniya Kharakteristicheskoy Vyazkosti. (in Russian).
7. ASTM D-4243. Standard Test Method for Measurement of Average Viscometric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers and Boards.
8. Enciklopediya Polimerov. M.: Sovetskaya Enciklopediya. 1974;2:284. (in Russian).

9. **Осовская И.И., Антипова В.С.** Вязкость растворов полимеров. СПб.: Высшая школа технологии и энергетики, 2016.

10. **Baird P.J., Herman H., Stevens G.C.** Non-destructive and In-situ Analysis of Insulating Materials in High-Voltage Power Transformers // Proc. Intern. Conf. Solid Dielectrics. 2004. V. 2. Pp. 719—722.

11. **Baird P.J., Herman H., Stevens G.C., Jarman P.N.** Non-destructive Condition Assessment of Insulating Materials in Power Transformers // Proc. Intern. Symp. Electrical Insulating Materials. Kitakyushu, 2005. V. 2. Pp. 425—428.

12. **Zenova E.V., Chernyshev V.A.** Assessment of the Actual State of Insulation Gaps Large and Average Electric Motors // J. Chem. Sci. and Techn. 2015. V. 4. Iss. 2. Pp. 24—27.

13. **Fofana I., Hadjadj Y.** Electrical-based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers // Energies. 2016. V. 9. Pp. 679—705.

14. **Linhjell D., Lundgaard L.E., Gafvert U.** Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2007. V. 14. Pp. 156—169.

15. **Пат. № 114067 РФ.** Способ определения средней степени полимеризации полимерных материалов / В.А. Чернышев, В.А. Зенова, А.М. Тагаченко // Бюл. изобрет. 2013. № 29.

16. **Физика диэлектриков** / под ред. А.Ф. Вальтера. М.-Л.: ГИТТИ, 1932.

9. **Osovskaya I.I., Antipova V.S.** Vyazkost' rastvorov Polimerov. SPb.: Vysshaya Shkola Tekhnologii i Energetiki, 2016. (in Russian).

10. **Baird P.J., Herman H., Stevens G.C.** Non-destructive and In-situ Analysis of Insulating Materials in High-Voltage Power Transformers. Proc. Intern. Conf. Solid Dielectrics. 2004;2:719—722.

11. **Baird P.J., Herman H., Stevens G.C., Jarman P.N.** Non-destructive Condition Assessment of Insulating Materials in Power Transformers. Proc. Intern. Symp. Electrical Insulating Materials. Kitakyushu, 2005;2:425—428.

12. **Zenova E.V., Chernyshev V.A.** Assessment of the Actual State of Insulation Gaps Large and Average Electric Motors. J. Chem. Sci. and Techn. 2015;4;2:24—27.

13. **Fofana I., Hadjadj Y.** Electrical-based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. Energies. 2016;9:679—705.

14. **Linhjell D., Lundgaard L.E., Gafvert U.** Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2007;14:156—169.

15. **Pat. № 114067 RF.** Sposob Opredeleniya Sredney Stepeni Polimerizacii Polimernykh Materialov / V.A. Chernyshev, V.A. Zenova, A.M. Tagachenko. Byul. Izobret. 2013;29. (in Russian).

16. **Fizika dielektrikov** / pod Red. A.F. Val'tera. M.-L.: GITTI, 1932. (in Russian).

Сведения об авторах:

Чернышев Валентин Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: v.a.chern@mail.ru

Зенова Елена Валентиновна — доктор технических наук, профессор кафедры нанотехнологии микроэлектроники НИУ «МЭИ», начальник отдела разработки и исследований микро- и наносистем института нанотехнологий микроэлектроники РАН, e-mail: elena_zenova@mail.ru

Information about authors:

Chernyshev Valentin A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: v.a.chern@mail.ru

Zenova Elena V. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Nanotechnology of Microelectronics Dept., NRU MPEI, Head of the Development and Research of Micro- and Nanosystems Dept., Institute of Nanotechnology Microelectronics RAS, e-mail: elena_zenova@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 14.06.2018

The article received to the editor: 14.06.2018