

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (05.09.02)

УДК 621.314.212

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-85-91

## Анализ методов измерения величины молекулярного веса полимерных материалов изоляционной конструкции энергетического оборудования в процессе его эксплуатации

В.К. Козлов, В.Н. Осотов, В.А. Чернышев

Актуальность проблемы измерения степени полимеризации (молекулярного веса) полимерных диэлектрических систем определяется ее практической значимостью, которая предполагает наличие надежного метода измерения степени полимеризации, в полной мере отвечающего требованиям обслуживания энергетического оборудования. Проблема сложна, а требования достаточно жестки. Общественным Советом специалистов по диагностике силового электрооборудования при ИТЦ «УралЭнергоИнженеринг» в 2017 г. начаты исследования существующих и вновь разрабатываемых способов оценки степени полимеризации изоляционных бумаг, формирующих изоляционную конструкцию силового электрооборудования. В них принимали участие и научные группы с различными подходами к решению поставленной проблемы.

Приведены результаты обсуждения отличающихся (по своей природе) методов измерения степени полимеризации (химических, оптических и электрических), изложенные в докладах на межрегиональном научно-практическом семинаре в Смоленском филиале НИУ «МЭИ» 26 апреля 2018 г. В них подчеркнута (ИТЦ «УралЭнергоИнженеринг», доцент В.Н. Осотов), что рекомендуемый нормативными документами метод (химический) не позволяет получить полного представления о степени старения бумажной изоляции. Косвенные методы (анализ газов, растворенных в масле; содержание в нем фуранов и т. п.) не дают количественной оценки степени старения работающей изоляционной системы. Альтернативные методы неразрушающего контроля и устройства для оценки степени полимеризации изоляционных бумаг: спектральный (Казанский энергетический университет, проф. В.К. Козлов) и метод токов диэлектрической абсорбции (Смоленский филиал НИУ «МЭИ», проф. В.А. Чернышев) в большей степени отвечают требованиям обслуживания энергетического оборудования.

*Ключевые слова:* изоляционная система, степень полимеризации, спектр токов диэлектрической абсорбции, оптические методы измерения, энергетическое оборудование.

*Для цитирования:* Козлов В.К., Осотов В.Н., Чернышев В.А. Анализ методов измерения величины молекулярного веса полимерных материалов изоляционной конструкции энергетического оборудования в процессе его эксплуатации // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 85—91. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-85-91.

## Analysis of Methods for In-Service Measurements of the Molecular Weight of Polymeric Materials Used in the Power Equipment Insulation Structure

V.K. Kozlov, V.N. Osotov, V.A. Chernyshev

The need of solving the problem concerned with measuring the polymerization degree (molecular weight) of polymeric dielectric systems is stemming from its practical significance, which implies the availability of a reliable polymerization degree measurement method that would fully meet the power equipment maintenance requirements. The problem is rather intricate in nature, and the requirements are quite stringent. In 2017, the Public Council of Specialists for Diagnostics of Power Electrical Equipment at the Engineering Technical Center (ETC) of UralEnergEngineering commenced studies of existing and newly developed methods for estimating the polymerization degree of insulating papers that form the insulating structure of power electrical equipment. These studies were carried out with participation of scientific groups, which used different approaches to solving the stated problem.

The article presents the results from discussion of polymerization degree measurement methods differing from each other in nature (chemical, optical and electrical), which were outlined in the reports presented at the Interregional Scientific and Practical Workshop held in the Smolensk Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI) on April 26, 2018. It is emphasized in them (ETC

of UralErgoEngineering, Associate Professor V.N. Osotov) that the chemical method recommended by the relevant regulatory documents does not allow one to get a full idea about the paper insulation ageing degree. Indirect methods (analysis of gases dissolved in oil, content of furans in it, etc.) do not yield a quantitative assessment of the ageing degree of the operating insulation system. Alternative methods of nondestructive testing and devices for estimating the polymerization degree of insulating papers: the spectral one (developed by Professor V.K. Kozlov from the Kazan Power Engineering University) and the method of dielectric absorption currents (developed by Professor V.A. Chernyshev from the Smolensk Branch of the NRU MPEI) meet the power equipment maintenance requirements to a fuller extent.

**Key words:** insulation system, polymerization degree, spectrum of dielectric absorption currents, optical measurement methods, power equipment.

**For citation:** Kozlov V.K., Osotov V.N., Chernyshev V.A. Analysis of Methods for In-Service Measurements of the Molecular Weight of Polymeric Materials Used in the Power Equipment Insulation Structure. Bulletin of MPEI. 2019;4:85—91. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-85-91.

## Введение

Проблема измерения величины молекулярного веса полимерных диэлектрических материалов в настоящее время все еще значима и актуальна. Это связано с тем, что величина степени полимеризации (СП) перестает быть только характеристикой полимерных диэлектриков, определяющей свойства и возможность их практического применения. Величину СП пытаются использовать в качестве эффективного параметра управления временем жизни энергетического оборудования и его состояния. Однако применение степени полимеризации в данном качестве предполагает существование надежного метода измерения величины СП полимерного материала, формирующего изоляционную систему энергетического устройства непосредственно на месте его эксплуатации (*in-site* методы), не нарушая при этом конструкционного совершенства в целом. Это особенно важно при эксплуатации и разработке «интеллектуального» трансформатора в заданном временном интервале. Таким образом, проблема разработки метода надежного контроля величины СП полимерной изоляции силового энергетического оборудования в процессе его эксплуатации становится центральной и постоянно привлекает внимание специалистов и целых научных коллективов на протяжении последних 15 — 25 лет. [1, 2]. При этом в каждом отдельном случае исследованию подлежат различные методы измерения (химические, оптические, электрические) с точки зрения их пригодности для оценки состояния изоляционной системы энергетического оборудования в целом.

## Состояние проблемы и возможные подходы к ее решению

К сожалению, имеющиеся в литературе сведения оказываются разрозненными и не позволяют придти к единому мнению относительно выбора метода измерения СП, наиболее полно отвечающего требованиям современной энергетики. К тому же сам объект контроля не отличается однозначностью мнений специалистов, относительно возможности значений СП играть роль параметра контроля состояния изоляционной конструкции и управления временем ее жизни. Во-первых, отмечается нестабильность начальных значений СП изоляционных бумаг, формирующих изоляционную

конструкцию эксплуатируемого устройства. Диапазон возможных значений СП<sub>0</sub> укладывается в пределах от 700 до 1900 стр. ед. [3]. Во-вторых, имеется неоднозначность критических значений (СП<sub>кр</sub> = 200, 250, 300 стр. ед.), исключающих возможность получения достоверной информации о состоянии изоляционной конструкции. В-третьих, существует слабая зависимость электрических свойств изоляционных бумаг от величины степени их полимеризации, контроль которых относится к неразрушающим видам измерения. Все это вызывает большие трудности при формировании экспертного заключения о состоянии изоляционной конструкции и оценке уровня тревоги, что в конечном итоге делает подобные методы диагностики малоэффективными [4, 5].

Перечисленные затруднения стали основным предметом анализа и обсуждения на межрегиональном научно-практическом семинаре по современным методам оценки состояния силовых трансформаторов, состоявшемся 26 апреля 2018 г. в Смоленском филиале НИУ «МЭИ» под руководством проф. В.А. Чернышева.

Были подведены первые итоги совместных исследований, проводимых по инициативе Общественного Совета специалистов по диагностике силового электрооборудования при ИТЦ «УралЭнергоИнженеринг».

Исследования направлены на обобщение имеющегося опыта и разработку метода оценки состояния изоляционной системы по измеренной величине степени полимеризации. Они начались в 2017 г. и проводились совместно со специалистами Казанского государственного энергетического университета (д.ф.-м.н., профессор В.К. Козлов) и Смоленского филиала НИУ «МЭИ» (д.т.н., профессор В.А. Чернышев). Координатор проводимых исследований — член Совета специалистов по диагностике к.т.н., доцент В.Н. Осотов.

В своем обобщающем докладе В.Н. Осотов исходил из существующего в литературе постулата: «...срок службы изоляционной системы трансформаторов определяется сроком службы бумажной изоляции...», — поэтому оценка срока службы бумажной изоляции должна быть обеспечена надежными и эффективными методами оценки, включающими теоретически обоснованную методологию, коммерчески доступное аппаратное оформление, гарантирующее требуемый уровень метрологического обеспечения, и

современные методы обработки и анализа результатов измерения, исключают потерю полезной информации [6, 7]. На практике определение величины СП образцов бумаг, формирующих изоляционную систему эксплуатируемого трансформатора, наталкивается на ряд трудно решаемых проблем. Одной из которых является отбор образца витковой бумажной изоляции из зоны наибольшего её старения, находящейся внутри обмоток. Отобрать образцы без повреждения бумажной изоляции практически невозможно, поэтому, чаще всего, образцы изоляции берутся из других доступных, но далёких от зоны максимального старения мест. Это обстоятельство обесценивает результаты анализа, сопутствующие затраты на проведение которого (разгерметизация трансформатора, слив масла из бака, отбор пробы бумажной изоляции и т. д.) на несколько порядков превышают стоимость самого анализа. Фактически корректные результаты могут быть получены только на аварийно повредившихся трансформаторах. Таким образом, общепризнанный и закреплённый в нормативной документации метод не позволяет получить адекватное представление о степени старения бумажной изоляции трансформаторов, находящихся в эксплуатации. Для оценки степени старения бумажной изоляции применяются косвенные методы (анализ растворённых в масле газов, содержание в масле фурановых соединений и т. п.). Однако они дают лишь общее представление о наличии процессов старения бумажной изоляции, не давая адекватной количественной оценки степени этого старения [8 — 11]. Следовательно, разработка и внедрение альтернативных методов оценки СП бумажной изоляции, исключающих повреждение изоляции и существенно снижающих общие затраты на проведение анализов, действительно актуальны.

Специалистами Смоленского филиала НИУ «МЭИ» (д.т.н., профессор В.А. Чернышев, метод токов диэлектрической абсорбции) и Казанского энергетического университета (д.ф.-м.н., профессор В.К. Козлов, спектральный метод) разработаны новые методы

оценки СП, позволяющие решить поставленные задачи [4, 5]. Измерения СП методом токов диэлектрической абсорбции (ТДА) проходят на отключённом от сети трансформаторе при плановых профилактических испытаниях. Для измерений СП спектральным методом (СПР) необходимо отключить трансформатор от сети, слить масло из бака и обеспечить доступ к его активной части. Отбор образца бумажной изоляции травмирующими методами в этом случае не требуется. Учитывая привлекательность методов ТДА и СПР, общественным Советом специалистов по диагностике силового электрооборудования при ИТЦ «УралЭнергоИнжиниринг» в 2017 г. совместно со специалистами Смоленского филиала НИУ «МЭИ» и Казанского энергетического университета были начаты исследования по обобщению имеющегося опыта оценки СП бумажной изоляции силовых трансформаторов различными методами.

На первом этапе опыты проводили на трёх образцах обмотки автотрансформатора типа АТДЦТН-125000/220, повредившегося в работе из-за виткового замыкания после 6 лет эксплуатации. Образцы отбирали из трёх зон, расположенных неподалёку от места возникновения виткового замыкания, но не загрязнённых продуктами разложения масла и бумажной изоляции, образовавшихся в зоне повреждения. Провод обмотки состоял из 13 элементарных проводников с эмалевой изоляцией. Витковая изоляция провода в целом включала шесть слоёв кабельной бумаги (толщина каждого слоя — 0,1 мм). Измерение СП методом токов диэлектрической абсорбции (СПТДА) проводили на образцах в целом, поскольку провести измерения на каждом слое кабельной бумаги этим методом невозможно. Измерения СП спектральным (СПСПР) и химическим (СПХИМ) методами проводили для каждого слоя витковой изоляции, а СП бумажной изоляции образца в целом в этих случаях определяли как среднее значение из всех измерений. Обобщённые результаты измерений представлены в таблице.

**Сопоставление результатов оценивания значений СП**

Номер образца	Оценка среднего значения СП разными методами			Соотношение средних значений
	СП <sub>ХИМ</sub>	СП <sub>СПР</sub>	СП <sub>ТДА</sub>	
1	902	615	504	$СП_{СПР}/СП_{ТДА} = 1,22$ $СП_{ХИМ}/СП_{СПР} = 1,47$ $СП_{ХИМ}/СП_{ТДА} = 1,79$
2	990	524	643	$СП_{СПР}/СП_{ТДА} = 0,81$ $СП_{ХИМ}/СП_{СПР} = 1,89$ $СП_{ХИМ}/СП_{ТДА} = 1,54$
3	1400	727	588	$СП_{СПР}/СП_{ТДА} = 1,24$ $СП_{ХИМ}/СП_{СПР} = 1,92$ $СП_{ХИМ}/СП_{ТДА} = 2,38$
Среднее значение СП <sub>сп</sub>	1097	622	578	$СП_{СПР}/СП_{ТДА} = 1,08$ $СП_{ХИМ}/СП_{СПР} = 1,76$ $СП_{ХИМ}/СП_{ТДА} = 1,90$

Совпадение результатов, полученных методом ТДА и СПР, на данном этапе можно считать удовлетворительным. Существенное отличие результатов, полученных химическим методом, от результатов ТДА и СПР требует специального изучения. Вероятнее всего, отличие обусловлено различием в методах подготовки образцов к измерению. Следует подчеркнуть, что результаты, полученные методом ТДА на образцах обмотки, удовлетворительно коррелируются с результатами измерения СПТДА на реальных трансформаторах.

На рисунке 1 представлены результаты измерения СПТДА на силовых трансформаторах с разным сроком службы. Даже при измерениях на новых трансформаторах на заводе изготовителе значения СПТДА располагались на уровне 800 ед. Этот факт позволяет считать полученные на образцах результаты измерений СПТДА и СПСПР вполне корректными и позволяет продолжать начатые исследования.

#### Оптический метод

В докладе профессора В.К. Козлова детально рассмотрен вопрос определения степени полимеризации бумажно-масляной изоляции трансформаторов оптическим методом в видимой области спектра. Обсуждая достоинства СП, как параметра контроля состояния изоляционной системы силового трансформатора, обосновывается необходимость разработки более совершенных методов контроля, отдавая предпочтение оптическим, как более точным и надежным. Анализируемая методика определения СП бумажно-масляной изоляции реализована с помощью спектрального прибора для видимого диапазона на длине волн 650 нм. При разработке указанного метода использованы результаты исследования зависимости величины коэффициента отражения от степени полимеризации для образцов изоляционных бумаг и электрокартона, входивших в состав изоляционных конструкций силовых трансформаторов с различным сроком службы.

Для образцов измерены коэффициенты отражения и значения степени полимеризации. Установленные при этом зависимости даны на рис. 2, 3, а их регрессионные аналоги представлены следующими соотношениями:

$$СП_{\rho} = 4570,8\rho_{\rho} - 2578,1;$$

$$СП_{T} = 1903,5\rho_{T} - 712,43.$$

Приведенные экспериментальные данные позволили авторам подойти к созданию специального измерительного устройства, контролирующего степень полимеризации твердой изоляции эксплуатируемого трансформаторного оборудования. Актуальность разработки подобного устройства подтверждена требованиями Министерства энергетики Российской Федерации, изложенными в приказе № 676 от 26 июля 2017 г., в котором одним из параметров функционального узла при оценке состояния обмоток трансформатора является степень полимеризации.

Разработанное устройство состоит из двух блоков и системы регистрации на базе контроллера. Первый блок — устройство облучения бумажной изоляции, а второй — устройство регистрации отражающего излучения.

Для выполнения оптимальных условий и регистрации с определенной геометрией эксперимента разработан корпус, формирующий потоки оптического и регистрируемого излучений, исключающий возможность регистрации для зеркально отражённого излучения и регистрирующий только диффузный отраженный от бумаги свет. Источником излучения выбран красный светодиод с длиной волны излучения 650 нм, для регистрации отраженного излучения подобран фотодиод марки BPW21R с рабочей областью 420...675 нм, благодаря своим оптимальным характеристикам на длинах волн 650...655 нм.

Технические характеристики устройства: диапазон измерения устройства — от 250 до 2000 ед.; напряжение питания — 5 В; рабочая температура —

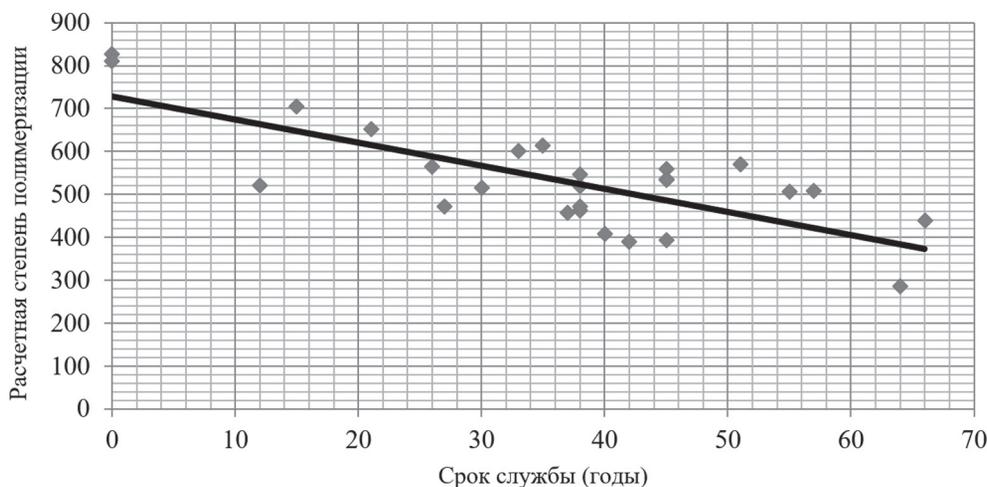
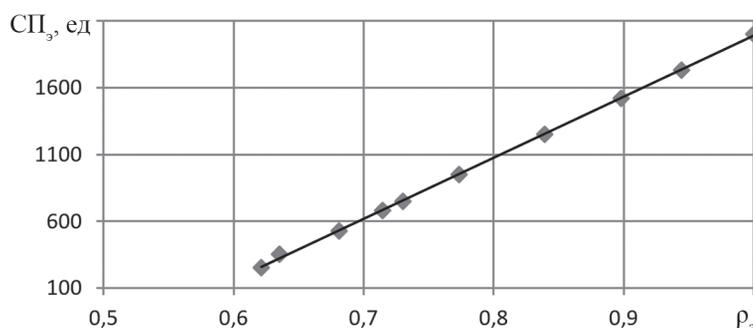
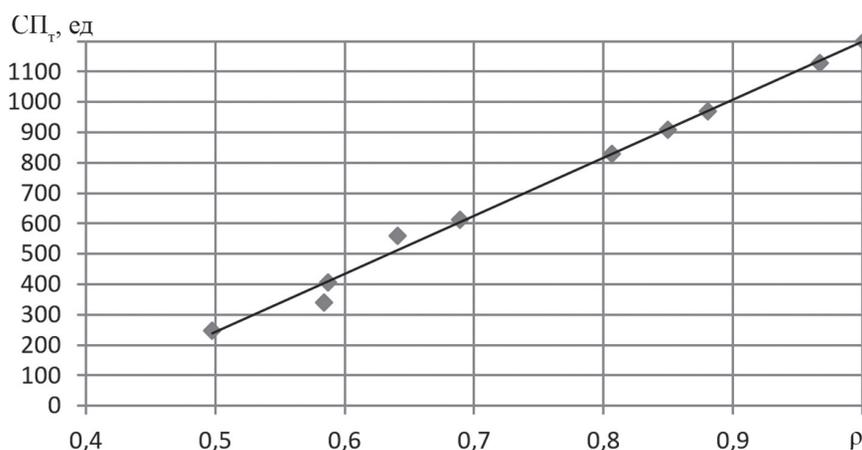


Рис. 1. Зависимость средней степени полимеризации целлюлозы от срока службы силовых трансформаторов

Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения  $\rho_3$  от степени полимеризации элетрокартона СП<sub>3</sub> на волне 650 нмРис. 3. Зависимость коэффициента отражения  $\rho_t$  от степени полимеризации трансформаторной бумаги СП<sub>t</sub> на длине волны 650 нм

–40...+100 °С. Оно работает по специально разработанной программе, позволяющей регулировать интенсивность облучения в широком интервале интенсивностей и регистрировать отраженное излучение. Таким образом, устройство исключает отбор проб, внесение дефектов в изоляционную систему трансформатора и совершенствует систему мониторинга и диагностики трансформаторного и реакторного оборудования. Точность получаемых значений коэффициентов отражения бумажной изоляцией обеспечивается отсутствием влияния трансформаторного масла на процесс измерения, так как в выбранной части спектра поглощение оптического излучения маслом отсутствует. Кроме того использование такого устройства в системе «интеллектуального» трансформатора позволяет контролировать состояние бумажно-масляной изоляционной системы в режиме реального времени.

#### Метод токов диэлектрической абсорбции

В докладе профессора В.А. Чернышева актуальность и значимость проблемы измерения величины молекулярного веса (степени полимеризации) полимерных диэлектрических материалов связывается с необходимостью формирования эффективного параметра управления временем жизни эксплуатируемого энергетического оборудования. Конечная цель таких подходов представляется в виде внедрения в практику

эксплуатации глубоко обоснованного и экономически целесообразного технического обслуживания энергетического оборудования. Большими возможностями в таких случаях, по мнению автора, обладают методы измерения спектров токов диэлектрической абсорбции. В их основу заложены представления о движении заряженных частиц, как движении стоксовского тела в диэлектрической среде с вязкостью  $\eta_{уд}$  под действием постоянно приложенного электрического поля. Поэтому, для изоляционного промежутка, находящегося под контролем, по экспериментально полученным значениям величины тока, спадающей со временем, строится спектр токов диэлектрической абсорбции, представляющий собой зависимость  $iI(t) = f(t)$ . Интенсивность спектра и характер его изменения во времени определяются не только количеством и видом частиц, участвующих в процессах поляризации, но и их подвижностью в электрическом поле. С другой стороны, согласно правилу Вальдена–Писаржевского [11], произведение удельной проводимости жидкой диэлектрической среды  $\gamma$  на величину ее вязкости  $\eta$  считается константой. Следовательно, в докладе, представляя полимерный диэлектрик в виде вязкой жидкости, правило Вальдена–Писаржевского записывается в виде  $\eta\gamma = \text{const}$ . Таким образом, вязкость диэлектрической среды удастся поставить под надежный приборный

контроль, а величину степени полимеризации связать с контролируемым на опыте значением обобщенного индекса поляризации с помощью регрессионного соотношения  $СП = Atri^n$ , где  $A$ ,  $n$  определяются при градуировке. Как правило, установленные регрессионные соотношения формализуют накопленный опыт эксплуатации подобного рода энергетического оборудования и служат, согласно базифункциональной концепции, базой сравнения при количественной оценке состояния изоляционной системы.

Изложенные подходы к решению проблемы управления временем жизни энергетического оборудования рассматривают предложенный способ определения СП как метод, расширяющий диагностические возможности спектров токов диэлектрической абсорбции и существенно расширяющий инструментарий оценивания состояния эксплуатируемого оборудования. При этом на практике изучается не величина СП, а степень нарушения структуры твердого диэлектрика в относительных единицах, что позволяет оценить индекс состаренности  $IA_{ging}$  и оставшийся ресурс времени эксплуатации изоляционной конструкции. Именно такие подходы к определению параметров технической системы делают техническое обслуживание обоснованным и экономически целесообразным.

### Литература

1. Резник А.С., Журавлева Н.М., Кизеветтер Д.В., Ташланов Д.О. Влияние степени полимеризации макромолекулы целлюлозы на работоспособность бумажно-пропитанной изоляции // Научно-технические ведомости СПбПУ. Серия «Естественные и инженерные науки». 2017. Т. 23. № 2. С. 53—61.
2. Лоханин А.К. Краткие обзоры докладов 43 сессии СИГРЕ // Электроэнергия. Передача и перераспределение. 2010. № 3. С. 80—87.
3. Львов М.Ю. и др. Старение целлюлозной изоляции обмоток силовых трансформаторов // Электрические станции. 2004. № 10. С. 11—15.
4. Журавлева Н.М. и др. Повышение срока службы бумажно-пропитанной изоляции // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 9 (40). С. 22—24.
5. Prevorst N.A. Transformer Insulation Upgrading and Loading Guide Equation. Panel Session IEEE Transformer Committee. Insulation Life Subcommittee. 2005.
6. Львов М.Ю. и др. Оценка предельного состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов // Электрические станции. 2008. № 1. С. 44—49.
7. Майоров А.В., Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Комаров В.Б. Методологические аспекты предотвращения внутренних коротких замыканий, взрывов и пожаров силовых трансформаторов при эксплуатации // Электрические станции. 2018. № 5. С. 19—22.

### Выводы

Степень полимеризации, как характеристика материала, определяющая его свойства, может быть использована в качестве параметра контроля степени устойчивости изоляционной конструкции к механическим нагрузкам в процессе ее эксплуатации.

Величина степени полимеризации, характеризующая особенности структурного совершенства изоляционной конструкции энергетического оборудования, хотя и обладает свойствами комплексности, но не является комплексной характеристикой в целом. Подтверждение тому — слабая зависимость пробивного напряжения и ряда других характеристик материала от величины степени полимеризации, так как значения этих параметров в основном определяются силами внутримолекулярного взаимодействия. Вязкость диэлектрической среды (величина СП) характеризуется силами межмолекулярного взаимодействия. Поскольку величина степени полимеризации значительно меньше сил внутримолекулярного взаимодействия, то не может в полной мере выступать в качестве эффективной меры состояния изоляционной системы.

Методы измерения СП весьма полезны и в значительной степени расширяют современный инструментарий обслуживания эксплуатируемого энергетического оборудования.

### References

1. Reznik A.S., Zhuravleva N.M., Kizevetter D.V., Tashlanov D.O. Vliyanie Stepeni Polimerizatsii Makromolekuly Tsellyulozy na Rabotosposobnost' Bumazhno-propitannoy Izolyatsii. Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti SPbPU. Seriya «Estestvennye i Inzhenernye Nauki». 2017; 23;2:53—61. (in Russian).
2. Lokhanin A.K. Kratkie Obzory Dokladov 43 Sessii SIGRE. Elektroenergiya. Peredacha i Pereraspredelenie. 2010;3:80—87. (in Russian).
3. L'vov M.Yu. i dr. Starenie Tsellyuloznoy Izolyatsii Obmotok Silovykh Transformatorov. Elektricheskie Stantsii. 2004;10:11—15. (in Russian).
4. Zhuravleva N.M. i dr. Povyshenie Sroka Sluzhby Bumazhno-propitannoy Izolyatsii. Mezhdunarodnyy Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal. 2015;9 (40):22—24. (in Russian).
5. Prevorst N.A. Transformer Insulation Upgrading and Loading Guide Equation. Panel Session IEEE Transformer Committee. Insulation Life Subcommittee. 2005.
6. L'vov M.Yu. i dr. Otsenka Predel'nogo Sostoyaniya Silovykh Transformatorov i Avtotransformatorov. Elektricheskie Stantsii. 2008;1:44—49. (in Russian).
7. Mayorov A.V., L'vov M.Yu., L'vov Yu.N., Komarov V.B. Metodologicheskie Aspekty Predotvrashcheniya Vnutrennikh Korotkikh Zamykaniy, Vzryvov i Pozharov Silovykh Transformatorov pri Ekspluatatsii. Elektricheskie Stantsii. 2018;5:19—22. (in Russian).

8. **Ванин Б.В., Львов М.Ю., Львов Ю.Н.** О повреждении силовых трансформаторов напряжением 110...500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. 2001. № 9. С. 53—58.

9. **Зенова Е.В., Чернышев В.А., Тагаченков А.М., Кисляков М.А.** Формирование обобщённого индекса поляризации как параметра состояния изоляционных промежутков // Электротехника. 2010. № 11. С. 48—52.

10. **Козлов В.К., Сабитов А.Х.** Диагностика состояния бумажной изоляции маслонаполненного электрооборудования // Диагностика электрических установок: Материалы X объединённого науч.-практ. семинара по проблемам эксплуатации, диагностирования, ремонта и продления срока службы трансформаторов. Новосибирск: Изд-во Сибпринт, 2015. С. 118—122.

11. **Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.** Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

8. **Vanin B.V., L'vov M.Yu., L'vov Yu.N.** O Povrezhdenii Silovykh Transformatorov Napryazheniem 110...500 kV v Ekspluatatsii. Elektricheskie Stantsii. 2001;9:53—58. (in Russian).

9. **Zenova E.V., Chernyshev V.A., Tagachenkov A.M., Kislyakov M.A.** Formirovanie Obobshchennogo Indeksa Polyarizatsii kak Parametra Sostoyaniya Izolyatsionnykh Promezhtkov. Elektrotekhnika. 2010;11:48—52. (in Russian).

10. **Kozlov V.K., Sabitov A.Kh.** Diagnostika Sostoyaniya Bumazhnoy Izolyatsii Maslonapolnennogo Elektrooborudovaniya. Diagnostika Elektricheskikh Ustanovok: Materialy X Ob'edinennogo Nauch.-prakt. Seminara po Problemam Ekspluatatsii, Diagnostirovaniya, Remonta i Prodleniya Sroka Sluzhby Transformatorov. Novosibirsk: Izd-vo Sibprint, 2015:118—122. (in Russian).

11. **Bogoroditskiy N.P., Pasyнков V.V., Tareev B.M.** Elektrotekhnicheskie Materialy. L.: Energoatomizdat, 1985. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Козлов Владимир Константинович** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетических сетей и систем Казанского государственного энергетического университета, e-mail: Kozlov\_vk@bk.ru

**Осотов Вадим Никифорович** — кандидат технических наук, доцент, ООО «ИТЦ» УралЭнергоИнженеринг», e-mail: sovetdiag@yandex.ru

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

#### Information about authors:

**Kozlov Vladimir K.** — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Electric Power Networks and Systems Dept., Kazan State Power Engineering University, e-mail: Kozlov\_vk@bk.ru

**Osotov Vadim N.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor, Open Company «ITTs» «Uralenergmontazh», e-mail: sovetdiag@yandex.ru

**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

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 25.07.2018

**The article received to the editor:** 25.07.2018