

# Определение состояния и остаточного ресурса силового электроэнергетического оборудования

ЧЕРНЫШЕВ В.А., ЗЕНОВА Е.В., ГРИГОРЯН В.Р.

*Дан анализ существующих способов контроля состояния изоляционных материалов электрооборудования и предложен новый метод оценки состояния, основанный на измерении степени деформации графика зависимости  $\varepsilon''(t)$  в процессе старения работающих в промежутке изоляционных материалов.*

*Ключевые слова: силовые трансформаторы, изоляционная система, параметр контроля, индекс поляризации, изоляционный промежуток, абсорбционный ток*

Достоверность современных методов оценки технического состояния электроэнергетического оборудования (ЭЭО) несмотря на усилия исследователей и инженеров-практиков все еще не достигла желаемого уровня. Для достижения требуемого уровня достоверности оценок состояния технически сложного электрооборудования приходится прибегать к комплексному его обследованию или разрабатывать более совершенные методы контроля. В первом случае имеется в виду совместное одновременное использование принципиально различных по своей физической природе методов контроля (например хроматографический анализ растворенных газов в масле и вибрационное обследование корпуса трансформатора [1]). Во втором – использование более эффективных способов получения информации о состоянии объекта контроля [2].

В известных на сегодня способах оценки состояния ЭЭО пытаются использовать параметры контроля, такие как измеренные значения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , значения сопротивления изоляционного промежутка, максимума возвратного напряжения (RVM), плотности абсорбционного тока и др. [3]. Используя коррелированность этих величин с прочностными параметрами или структурой изоляционных материалов, по эмпирическим соотношениям определяют значение прочности изоляционной конструкции в контролируемый момент времени, что в конечном итоге позволяет оценить состояние и оставшийся ресурс времени. Характерным примером может служить способ определения остаточного ресурса времени кабеля с полиэтиленовой изоляцией [4], представленный в [5]. Параметром контроля в этом методе является положение релаксационного мак-

*Existing methods for monitoring the state of insulation materials used in electrical equipment are analyzed, and a new method of state estimation is proposed, which is based on measuring the extent to which the graph of  $\varepsilon''(t)$  is distorted due to ageing of insulating materials operating in a gap.*

*Key words: power transformers, state of insulation system, monitored parameter, generalized polarization index, insulation gap, absorption current*

симум тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ ) на частотной или температурной зависимости. Значение смещения этого максимума ( $\Delta f_m$ ) в процессе эксплуатации корреляционно связано с одной из характеристик прочности (значением температуры растрескивания полиэтилена  $T_x$ ) [5]:

$$T_x = 154 - 0,13\Delta f_m. \quad (1)$$

Однако информация о степени изношенности работающего изоляционного промежутка определяется значением деформации всей контролируемой зависимостью  $\text{tg}\delta$  в выбранной области температур или частот, а не только смещением одной ее точки (например  $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ ). Иными словами, смещения любой точки зависимости  $\text{tg}\delta(f)$  или  $\text{tg}\delta(T)$  в процессе старения материалов изоляционных промежутков характеризуют изменение подвижности если не основных, то довольно близких к ним релаксирующих молекулярных групп и также являются эффективными носителями своей части информации о состоянии изоляционного промежутка и всего ЭЭО в целом.

В представленном способе контроля состояния ЭЭО [6] сделана попытка исключить потерю значительного объема информации при оценке состояния состаренного оборудования путем измерения степени деформации всей графической зависимости коэффициента диэлектрических потерь в заданном временном интервале, а не в отдельной ее части.

При изучении спектров поляризационных токов, протекающих в объеме контролируемого изоляционного промежутка, было установлено, что наличие разнородных по своим электрическим свойствам материалов в нем приводит к появлению ярко выраженной структурной поляризации деба-

евского типа. В таком случае на зависимости  $\varepsilon''(t) = t j_{abc}(t)$  наблюдается один четко выраженный максимум (рис. 1,а). В начальной стадии старения такой изоляционной конструкции наблюдается заметное изменение параметров промежутка, что приводит к изменению не только значения, но и положения релаксационного максимума на графике. Однако это изменение не имеет четко выраженной тенденции и не может быть положено в основу оценки состояния. Напротив, при значительном старении изоляционной системы в ее твердой компоненте появляются микротрещины, микрополости, разрывы целостности структуры, которые проявляют себя как дополнительные элементы структурной поляризации, что выражается в появлении дополнительного максимума на зависимости  $\varepsilon''(t)$  (рис. 1,б). И если концентрация таких вновь образованных элементов структурной поляризации становится значительной, то размеры и положение второго максимума становятся доминирующими (рис. 1,в,г), свидетельствуя о том, что со-

стояние изоляционного промежутка является угрожающе опасным и требуются срочная разработка и реализация корректирующих мероприятий вплоть до вывода из работы такого ЭЭО.

Выявленные физические закономерности позволили предложить новый способ определения состояния и ресурса эксплуатируемой изоляционной конструкции. Суть его заключается в том, что экспериментально измеренный спектр поляризационного тока, представленный зависимостью  $\varepsilon''(t)$ , сопоставляется с некоторым семейством реперных кривых, каждая из которых получена опытным путем и отражает определенное состояние контролируемого промежутка и значение его ресурса (рис. 1,а—г).

Количественно оцененная степень близости анализируемой зависимости к каждой из реперных позволяет сформировать представление о состоянии контролируемого оборудования и значении его остаточного ресурса. Семейство реперных кривых, предварительно установленное экспериментально,

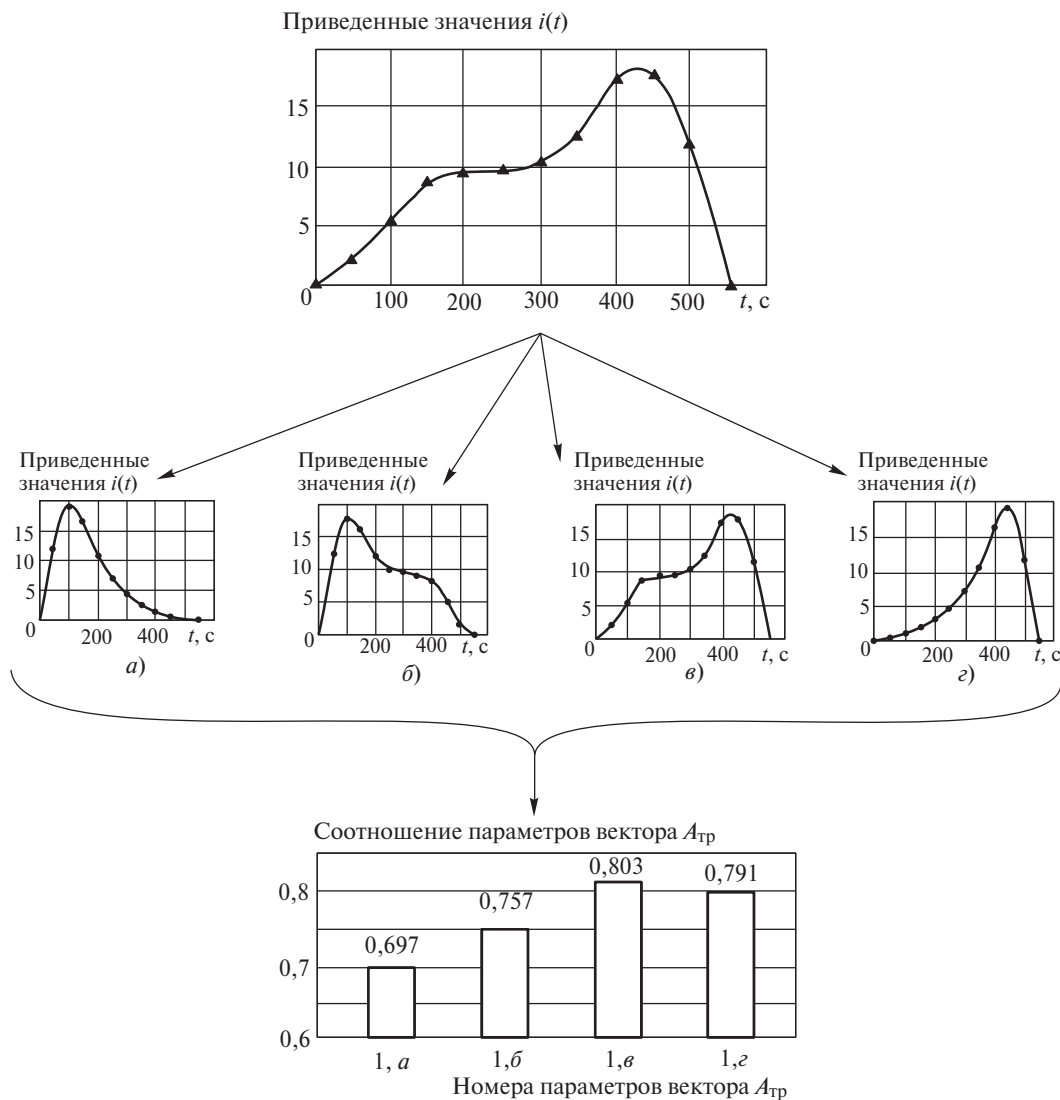


Рис. 1. Схема идентификации состояния и ресурса изоляции

в данном случае играет роль системы отсчета (градуировочная кривая), представленной в виде некоторой шкалы баллов.

Описываемый способ оценки состояния изоляционного промежутка как последовательность технологических операций реализуется следующим образом.

1. Изоляционный промежуток, подлежащий контролю, предварительно разряжается в течение 10 мин.

2. Измеряется зависимость сопротивления промежутка от времени воздействия приложенного напряжения  $R_{из}(t)$  (рис. 2).

3. Полученная зависимость  $R_{из}(t)$  с помощью соотношения

$$i_{абс}(t) = \frac{R_{из\max}}{R_{из}(t)} - 1 \quad (2)$$

преобразуется в зависимость  $\varepsilon''(t) = ti_{абс}(t)$  (рис. 3).

4. Устанавливается степень близости полученной зависимости  $\varepsilon''(t)$  с каждой из реперных с целью идентификации состояния изоляционного промежутка.

Рассмотренная последовательность операций реализуется с помощью приведенной ниже схемы измерения (рис. 4). Для проведения идентификации в блоке обработки каждая кривая из совокупности реперных  $\varepsilon''(t)_{\text{реп}}$  задается 12 точками, определяющими ее положение в плоскости выбранных координат. Каждой точке в соответствии с ее положением в данной плоскости координат присваивается коэффициент весомости  $a_{i,j}$ . Массив коэффициентов весомости точек, принадлежащих совокупности реперных кривых, формируется в виде матрицы весовых коэффициентов  $Ma_{i,j}$ :

$$Ma_{i,j} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & \dots & a_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k,1} & a_{k,2} & \dots & a_{k,n} \end{pmatrix}$$

Измеренная зависимость  $\varepsilon''(t) = ti_{абс}(t)$  для контролируемого изоляционного промежутка представляется в виде вектора  $X(t)$ , который определяет положение каждой точки  $\varepsilon''(t)$  в плоскости тех же самых координат. В результате вектор  $A_j$ , представляющий собой произведение  $A_j = Ma_{i,j} X(t)$ , позволяет соотнести кривую  $X(j)$  с каждой кривой из семейства эталонных и тем самым идентифицировать состояние изоляционной системы контролируемого ЭО. Для экспериментальных результатов, приведенных на рис. 2 и 3, вектор  $A_j$  определяется матрицей следующего вида:

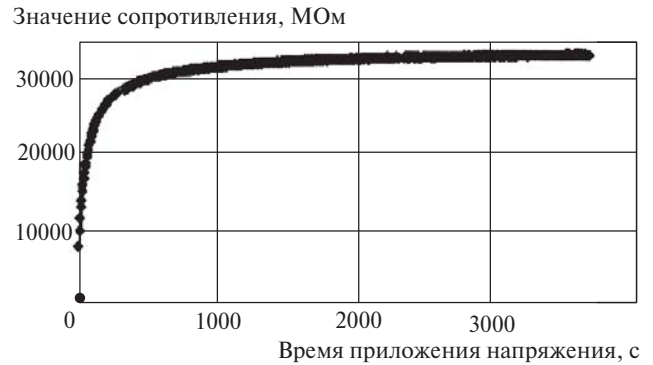


Рис. 2. Зависимость сопротивления участка изоляции от времени приложения напряжения

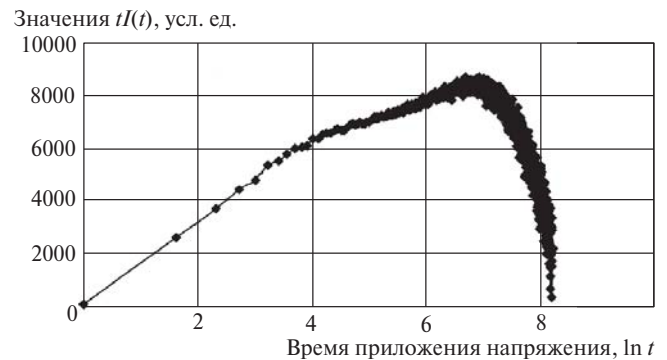


Рис. 3. Зависимость  $ti(t)$  от  $\ln t$  для трансформатора

$$A_{\text{тр}} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,697 \\ 0,757 \\ 0,803 \\ 0,791 \end{pmatrix}$$

В рассматриваемом случае значение  $A_1$  отождествляется с новой изоляционной системой;  $A_2$  — с системой, бывшей в эксплуатации, но сохранившей свои эксплуатационные свойства;  $A_3$  — с состаренной системой;  $A_4$  — с системой, находящейся в критическом состоянии. Соотношение параметров вектора  $A_j$  в графическом виде представлено на рис. 5. Так как значения  $A_3$  и  $A_4$  близки, то данная изоляционная система является не только состаренной, но и по своему состоянию приближается к критическому.

При реализации способа повышение достоверности оценки состояния и ресурса изоляционного промежутка достигается благодаря тому, что на опыте контролируется не только смещение релаксационного максимума, но и уровень деформации всего спектра диэлектрического поглощения, в составе которого при определенном уровне старения может появиться дополнительный релаксационный максимум, значение которого при дальнейшем старении начинает играть доминирующую роль в полном спектре поглощения, представленного зависимостью  $\varepsilon''(t) = ti(t)$ . Именно поэтому значение де-

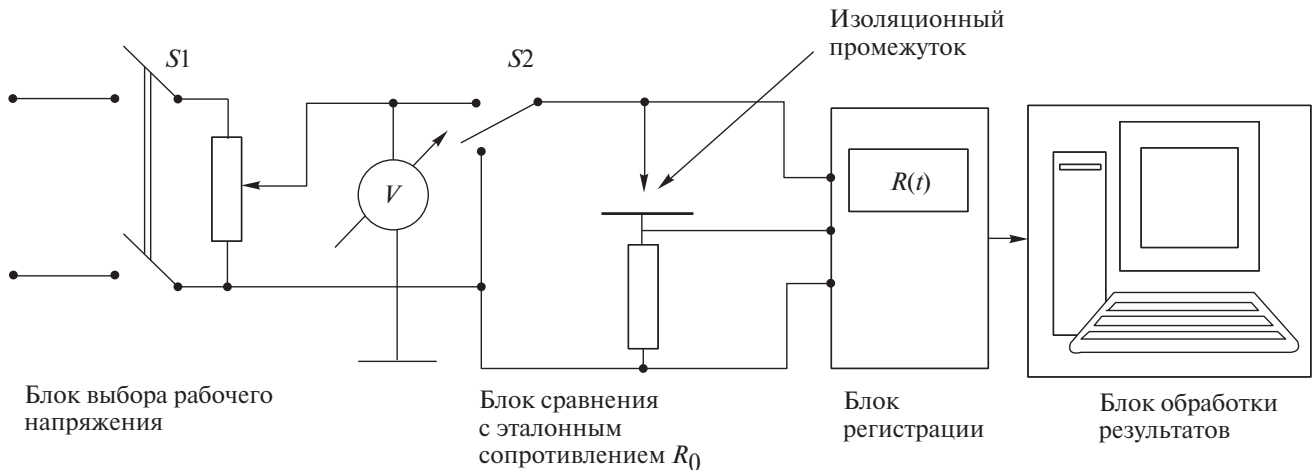
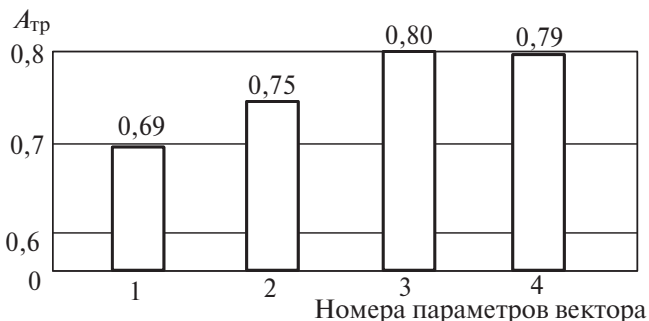


Рис. 4. Принципиальная схема измерения

Рис. 5. Соотношение параметров вектора  $A_{тр}$ 

формации всего спектра диэлектрического поглощения, обусловленного протеканием поляризационных токов в объеме контролируемого промежутка, действительно является интегральной характеристикой и не зависит от того, явилось ли старение изоляции следствием ее нагрева при неизменной нагрузке или следствием разовых или систематических перегревов.

Необходимо также отметить, что наиболее существенным моментом данного способа оценки состояния является метод формирования семантической шкалы баллов (новая, бывшая в употреблении и т.д.).

Сформированная в статье шкала позволяет проводить количественную оценку наших представлений о состоянии контролируемого объекта (выраженная в числовом виде степень близости реальной зависимости  $\epsilon''(t)$  к каждой реперной кривой). Этим самым семантической шкале баллов удастся придать четыре шкалы отрезков или даже шкалы отношений, обладающих не только свойствами аддитивности, но и мультипликативности. В результате «состояние» объекта можно рассматривать как некоторую «физическую» величину, поддающуюся надежному измерению, вместо имеющей в настоя-

щее время экспертной оценки состояния, основанной на опыте и интуиции эксперта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Degtyarev S.A., Dolin A.P., Pershina N.F., Smekalov V.V. Basic concepts of complex diagnostic inspection of transformers. — Electra, 2003, №2.
2. Аксенов Ю.П., Голубев А.В., Джикидзе В.В., Пронин В.В. Результаты диагностики трансформаторов тока ТФРН 330–750 кВ. Материалы VII симпозиума «Электротехника 2010» — М.: Изд. ВЭИ, 2003.
3. Чернышев В.А., Зенова Е.В. Контроль качества изоляционных промежутков электротехнического оборудования при эксплуатации. — Электричество, 2009, №6.
4. Роспатент №2044326. Способ определения состояния и ресурса электрической установки/А.И. Таджибаев, В.А. Канискин, Б.И. Сажин и др. Опубликовано 20.09.95.
5. Канискин В.А., Таджибаев А.И. Определение остаточного ресурса силовых кабелей. — Новости электротехники, 2003, 2(20).
6. Пат. РФ № 2373456. Способ определения состояния и ресурса изоляции/Е.В. Зенова, В.А. Чернышев, В.А. Чернов. Опубликовано 20.11.2009.

[24.05.10]

Авторы: **Чернышев Валентин Александрович** окончил в 1962 г. электромеханический факультет Томского политехнического института. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию «Теоретические основы работы и проектирования  $\alpha$ -ионизационных преобразователей параметров газообразных сред» в Московском энергетическом институте (МЭИ). Ведущий научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (ИНМЭ РАН). Профессор кафедры электроэнергетических систем МЭИ (ТУ).

**Зенова Елена Валентиновна** окончила в 1989 г. МЭИ. В 1996 г. в МЭИ защитила кандидатскую диссертацию «Основы разработки, конструирования и расчета  $\alpha$ -ионизационного преобразователя давления, работающего в области пониженных давлений». Ведущий научный сотрудник ИНМЭ РАН. Доцент кафедры полупроводниковой электроники МЭИ (ТУ).

**Григорян Виктор Размикевич** окончил Высшее специальное учебное заведение. Директор по науке ЗАО Научно-производственное объединение «Серния», Москва.