

УДК 533.08:543.712.08

В. И. ЗУБКО, Д. В. ЗУБКО, Г. Н. СИЦКО

ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: Zubko@bsu.by*

Разработан импедансный метод контроля и диагностики качества электроизоляционных материалов, используемых в электротехнической промышленности. Созданы электроемкостные измерительные преобразователи, разработана методика, получены формулы, проведены контроль и диагностика диэлектрических показателей электроизоляционных материалов, таких как относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, соответствующих нормам, регламентированным стандартам.

Ключевые слова: электроемкостной преобразователь, импедансный метод, электроизоляционный материал.

V. I. ZUBKO, D. V. ZUBKO, G. N. SITSKO

IMPEDANCE METHOD OF MONITORING AND DIAGNOSTICS OF QUALITY OF INSULATION MATERIALS, USED IN ELECTROTECHNICAL INDUSTRY

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: Zubko@bsu.by

A method of impedance control and diagnostics of quality of insulating materials, used in electrotechnical industry, is proposed. Electric-capacitive transmitters are created. Formulas to make monitoring and diagnostics of dielectric parameters of insulating materials, such as relative permittivity, dielectric loss tangent, and relevant standards are developed.

Keywords: electric-capacity converter, impedance method, insulating material.

Введение. Разработка импедансного метода (ИМ) контроля и диагностики качества электроизоляционных материалов (ЭМ), используемых в электротехнической промышленности, обусловлена необходимостью их тестирования на соответствие комплекса таких диэлектрических показателей, как относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ'), объемное удельное электрическое сопротивление (ρ), тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$), нормам, регламентированным стандартами. Реализация ИМ позволила эффективно использовать диэлектрические показатели для оперативного контроля и диагностики качества ЭМ. Необходимость проведения испытаний ЭМ и жидких диэлектриков на диэлектрические показатели подтверждают ГОСТ 22372–77; 20437–89; 17478–95; 2718–74; 21427–83.

В Республике Беларусь в настоящее время цифровые приборы для контроля и диагностики диэлектрических свойств ЭМ не производятся. Применяемые приборы импортного производства не включены в Государственный реестр приборов Республики Беларусь и не аттестованы в БелГИМе, что вызывает большие трудности с их поверкой.

Цель данной статьи – разработка ИМ, контроль и диагностика качества ЭМ на соответствие их диэлектрических показателей нормам, регламентированным стандартами.

Эквивалентные схемы конденсатора, замещенного диэлектриком с потерями, получение формул, методика определения комплекса диэлектрических показателей электроизоляционных материалов. В идеальном конденсаторе энергия не рассеивается и угол сдвига фаз между током и напряжением (φ) составляет 90° (рис. 1, а). При замещении конденсатора диэлектриком с потерями, когда через него протекает переменный ток, угол φ уменьшается на величину

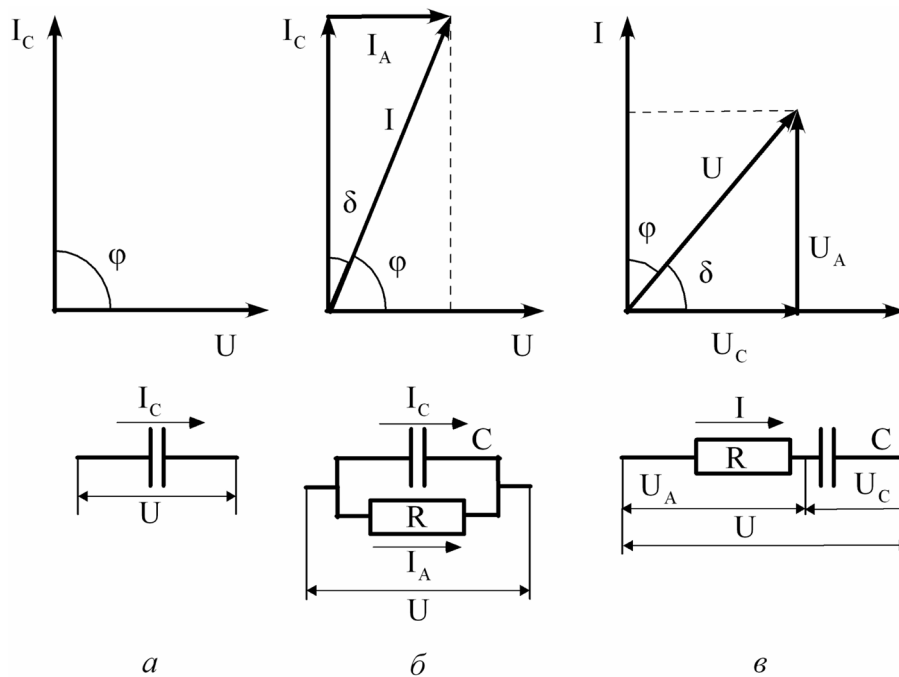


Рис. 1. Параметры эквивалентных схем конденсатора, замещенного диэлектриком с потерями: конденсатор без потерь (а), параллельная (б) и последовательная (в) схемы конденсатора, замещенного ЭМ с потерями

ну угла потерь (δ), который представляет собой угол сдвига фаз между векторами активного и реактивного токов (рис. 1, б).

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного ЭМ с потерями (рис. 1, б), более адекватно отражает реальные диэлектрические свойства материала в сравнении с последовательной эквивалентной схемой (рис. 1, в). В основу разработанного ИМ положено измерение величин полного сопротивления z и ϕ конденсатора, замещенного ЭМ с потерями, при протекании через него переменного электрического тока. Получение формул для вычисления комплекса диэлектрических показателей, таких как ϵ' , ρ и $\text{tg}\delta$, основано на анализе параллельной эквивалентной схемы конденсатора, замещенного ЭМ с потерями.

На рис. 2 представлена параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного ЭМ с потерями. Если конденсатора не заполнен ЭМ, то получим

$$1/z_0^2 = g_0^2 + \omega^2(c_0 + c_{\text{п}})^2, \quad (1)$$

где z_0 – полное сопротивление; g_0 – активная электрическая проводимость ЭМ; ω – круговая (циклическая) частота; c_0 – геометрическая емкость рабочей части конденсатора; $c_{\text{п}}$ – «паразитная» емкость конденсатора вместе со съёмными контактами.

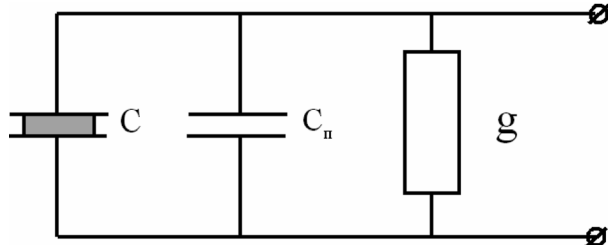


Рис. 2. Параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного ЭМ с потерями: g – активная электрическая проводимость ЭМ; $c_{\text{п}}$ – «паразитная» емкость конденсатора; $c = c_0\epsilon'$ – емкость конденсатора, замещенного ЭМ; c_0 – геометрическая емкость конденсатора; ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость ЭМ

Так как $g_0 \approx 0$, то

$$1/z_0 = \omega(c_0 + c_{\text{п}}). \quad (2)$$

Если измерительное пространство конденсатора заполнено ЭМ с потерями, тогда получим

$$1/z_0^2 = g_0^2 + \omega^2(c_0\epsilon' + c_{\text{п}})^2. \quad (3)$$

Тангенс сдвига между током и напряжением запишем как

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega(c_0\varepsilon' + c_{\Pi})}{g}. \quad (4)$$

Таким образом, получим три уравнения (2), (3), (4) с тремя неизвестными ε' , g , c_{Π} :

$$c_0 + c_{\Pi} = 1/z_0\omega, \quad (5)$$

$$1/z^2 = g^2 + \omega^2(c_0\varepsilon' + c_{\Pi})^2, \quad (6)$$

$$\omega^2(c_0\varepsilon' + c_{\Pi})^2 = g^2 \operatorname{tg}^2\varphi. \quad (7)$$

Из уравнений (6), (7) следует, что

$$1/z^2 = g^2 \operatorname{tg}^2\varphi, \quad (8)$$

или

$$1/z^2 = g^2(1 + \operatorname{tg}^2\varphi). \quad (9)$$

Отсюда

$$g = \frac{1}{z(1 + \operatorname{tg}^2\varphi)}. \quad (10)$$

Если в измерительное пространство конденсатора помещен ЭМ с величинами ε' и ρ , то справедливо следующее соотношение:

$$c\rho = \varepsilon'\varepsilon_0\rho. \quad (11)$$

Здесь c , r – емкость и электросопротивление измерительного пространства конденсатора с ЭМ; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Так как $r = 1/g$, а $c = c_0\varepsilon'$, то

$$c_0/g\varepsilon_0 = \varepsilon'\varepsilon_0\rho. \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует, что

$$\rho = c_0/g\varepsilon_0, \quad (13)$$

$$g = y \cos|\varphi|, \quad (14)$$

где y – полная электрическая проводимость ЭМ.

При учете, что

$$y = 1/z, \quad (15)$$

получим следующее выражение:

$$g = \frac{\cos|\varphi|}{z}. \quad (16)$$

После подстановки формулы (16) в (13) получим выражение для вычисления удельного электрического сопротивления ЭМ:

$$\rho = \frac{c_0 z}{\varepsilon_0 \cos|\varphi|}. \quad (17)$$

Запишем уравнения (5), (6) в следующем виде:

$$c_0 + c_{\Pi} = 1/z_0\omega, \quad (18)$$

$$c_0\varepsilon' + c_{\Pi} = \frac{\sqrt{1/z^2 - g^2}}{\omega}. \quad (19)$$

Вычтем из выражения (19) уравнение (18) и при учете (16) определим

$$c_0(\varepsilon' - 1) = \frac{\sqrt{1/z^2 - \cos^2 \varphi}}{\omega} - 1/z_0 \omega. \quad (20)$$

После преобразований уравнения (20) имеем

$$c_0(\varepsilon' - 1) = \frac{\sin|\varphi|}{z\omega} - \frac{1}{z_0\omega}. \quad (21)$$

Из уравнения (21) получим формулу для определения величины ε' ЭМ:

$$\varepsilon' = \frac{1}{\omega c_0} \left(\frac{\sin|\varphi|}{z} - \frac{1}{z_0} \right) + 1. \quad (22)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению активного и реактивного токов:

$$\operatorname{tg}\delta = i_a/i_p. \quad (23)$$

Из закона Ома для переменного тока следует

$$i_a = ug, \quad i_p = ub, \quad (24)$$

где b – реактивная проводимость.

В данном случае

$$b = \omega\varepsilon'c_0. \quad (25)$$

Учитывая формулы (23)–(25), определяем

$$\operatorname{tg}\delta = g/\omega\varepsilon'c_0. \quad (26)$$

Подставляя уравнение (16) в (26), получаем формулу для вычисления $\operatorname{tg}\delta$ ЭМ:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\cos|\varphi|}{z\omega\varepsilon'c_0}. \quad (27)$$

В уравнениях (17), (22), (27) геометрическая емкость измерительного пространства конденсатора c_0 входит как известная величина.

Без учета краевых эффектов электродов можно записать

$$c_0 = \frac{\varepsilon'\varepsilon_0 s}{d}, \quad (28)$$

где s – площадь пластины электрода; d – толщина образца.

С учетом краевых эффектов электродов из уравнения (22) получим формулу для определения геометрической емкости измерительного пространства конденсатора

$$c_0 = \frac{1}{\omega(\varepsilon_1 - 1)} \left(\frac{\sin\varphi_1}{z_1} - \frac{1}{z_0} \right). \quad (29)$$

Таким образом, при использовании эталонного материала с известной величиной ε_1 и измерении z_1 и φ_1 можно вычислить значение c_0 , которое в дальнейшем будет применено для определения ε' , ρ и $\operatorname{tg}\delta$ ЭМ.

Материалы и методы проведения исследования. Для диагностического контроля проверено десять образцов ЭМ на диэлектрические показатели. Ранее в [7] описана методика определения комплекса диэлектрических показателей полимерных материалов электротехнического назначения. На рис. 3 представлена малогабаритная импедансная установка диагностического кон-

троля комплекса диэлектрических показателей ЭМ электротехнического назначения в диапазоне частот 50 Гц – 1 МГц. Она включает в себя высокочувствительный электроемкостной преобразователь и малогабаритный цифровой измеритель импеданса с интерфейсом для вывода текущих результатов контроля на монитор экрана персонального компьютера. Конструкция высокочувствительного электроемкостного преобразователя представляет собой микрометрическое устройство со встроенным микровинтом, соединенным с подвижным дисковым электродом, симметрично расположенным с неподвижным электродом, рабочие поверхности которых отшлифованы, отполированы, хромированы и притерты друг к другу [8].



Рис. 3. Малогабаритная импедансная установка диагностического контроля диэлектрических показателей ЭМ электротехнического назначения

Высокочувствительный преобразователь [8] по сравнению с существующими аналогами [9–11] обладают следующими преимуществами:

получение информации о комплексе диэлектрических показателей ЭМ электротехнического назначения в диапазоне частот 50 Гц – 1 МГц;

обеспечение однородного электрического поля в объеме контролируемого ЭМ в диапазоне частот 50 Гц – 1 МГц;

малая величина диэлектрических потерь ($1,8 \cdot 10^{-5}$).

Результаты исследования и их обсуждение. Диагностический контроль показателей относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов ЭМ проводили на частоте 1 МГц, согласно нормам, регламентированным стандартом. В табл. 1 представлены среднестатистические значения диэлектрических показателей образцов ЭМ из пяти параллельных опытов при $(20 \pm 0,1)$ °С. Относительная погрешность определения диэлектрических показателей образцов ЭМ составляет $\pm 1,2\%$.

Таблица 1. Значения диэлектрических показателей образцов ЭМ

Диэлектрический показатель	Определяемый показатель	
<i>Электроизоляционный материал ГСП-8</i>		
ϵ'	5,42	По ГОСТ 17478–95 не более 7,0
$\text{tg}\delta$	0,02	не более 0,04
<i>Электроизоляционный материал АГ-4В</i>		
ϵ'	8,65	По ГОСТ 20437–89 не более 7,0
$\text{tg}\delta$	0,05	не более 0,04
<i>Дозирующий стекловолоконный материал ДСВ-20</i>		
ϵ'	6,65	По ГОСТ 17478–89 не более 7,0–8,0
$\text{tg}\delta$	0,020	не более 0,05
<i>Гранулированный стеклотекстолитовый волокнистый материал ГСП-8</i>		
ϵ'	6,60	По ГОСТ 17478–95 не более 7,0–8,0
$\text{tg}\delta$	0,025	не более 0,04

На основе анализа результатов испытаний установлено, что в пяти контролируемых образцах электроизоляционных материалов АГ-4В из одной партии относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь имеют завышенные диэлектрические показатели. Из табл.1 видно, что показатели относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для ЭМ АГ-4В равны 8,65 и 0,5, тогда как, согласно ГОСТ 20437–89, они составляют 7,0 и 0,04, соответственно. В пяти контролируемых образцах ЭМ ГСП-8 из разных партий диэлектрические показатели соответствуют нормам, регламентированным стандартом. Все остальные образцы ЭМ, поставленные для диагностического контроля диэлектрических показателей, соответствуют нормам, регламентированным стандартом.

Проведен диагностический контроль качества образцов полиамидов (ПА6) и поликарбонатов (ПК) на соответствие показателей относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ЭМ нормам, регламентированным стандартом. Диэлектрические показатели материалов определяли по методике в соответствии с ГОСТ 22372–77 «Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь».

В табл. 2, 3 приведены среднестатистические значения диэлектрических показателей образцов полимерных материалов из пяти параллельных опытов при $(20 \pm 0,1)^\circ\text{C}$.

Т а б л и ц а 2. Диэлектрическая проницаемость полимерных материалов

Полимерный материал	Значение ϵ' при различной частоте электрического поля ν , Гц				
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
ПА 6 (окрашенный образец)	4,1	4,0	3,85	3,75	3,59
ПА 6 (неокрашенный образец)	4,0	3,9	3,74	3,65	3,50
ПК	3,50	3,37	3,23	3,17	3,09

Т а б л и ц а 3. Тангенс угла диэлектрических потерь полимерных материалов

Полимерный материал	Величина $\text{tg}\delta$ при различной частоте электрического поля ν , Гц				
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
ПА 6 (образец черного цвета)	0,068	0,055	0,045	0,036	0,02
ПА 6 (образец белого цвета)	0,061	0,047	0,038	0,028	0,018
ПК	0,0075	0,0070	0,00650	0,0060	0,0050

В результате проведенных испытаний определены показатели относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов ПА6 и ПК. Установлено, что относительная диэлектрическая проницаемость образцов полиамидов ПА 6 на частоте электрического тока 1 МГц находится в интервале 3,50–3,59, а тангенс угла диэлектрических потерь составляет 0,018–0,02, что отвечает требованиям ГОСТ 17648–83, согласно которому данные показатели должны быть не более 4,0 и 0,02 соответственно. Относительная диэлектрическая проницаемость образцов ПК на частоте электрического тока 1 МГц составляет 3,09, а тангенс угла диэлектрических потерь – 0,005, что соответствуют требованию ТУ 2226-003-54887985–2002, согласно которому данные показатели должны быть не более 4,0 и 0,09 соответственно.

Закключение. Таким образом, малогабаритная импедансная установка, которой располагает научно-исследовательская лаборатория диэлектрической спектроскопии гетерогенных систем физического факультета Белорусского государственного университета, в дальнейшем может быть использована для диагностического контроля диэлектрических показателей электроизоляционных материалов на их соответствие нормам, регламентированным стандартом. Это позволяет проводить диагностический контроль и своевременно выявлять соответствие или несоответствие диэлектрических показателей электроизоляционных материалов, применяемых в высоковольтных электрических и радиотехнических устройствах.

Список используемой литературы

1. Оперативный контроль и диагностика электрических свойств полимерных композиций в зависимости от состава для различных частот электрического поля / И. Н. Ахвердов [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 4. – С. 40–44.
2. Влияние дисперсности и концентрации токопроводящей фазы на электрофизические свойства спеченных композиций кремний–стекло / И. Н. Ахвердов [и др.] // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1996. – № 4. – С. 3–7.
3. *Zubko, V. I.* Influence of the composition and temperature of concentrated magnetic fluids on their electrophysical properties for different frequencies of the electric field / V. I. Zubko, A. I. Lesnikovich, D. V. Zubko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2004. – Vol. 77, N 1. – P. 193–198.
4. *Зубко, В. И.* Об учете погрешностей при контроле электрических свойств материалов с большими потерями / В. И. Зубко, А. И. Лесникович, Д. В. Зубко // Техническая электродинамика. – 2008. – № 2. – С. 64–68.
5. <http://giprocement.ru/about/articles.html/p=6>.
6. Электропроводящая полимерная композиция: пат. на изобретение 13803 Респ. Беларусь / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. Опубл. 23.10.2008.
7. *Зубко, В. И.* Диэлькометрический метод контроля и диагностики электрических свойств полимерных материалов электротехнического назначения / В. И. Зубко, Д. В. Зубко, Г. Н. Сицко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 4. – С. 28–34.
8. *Зубко, Д. В.* Устройство для измерения электрических свойств полимерных композиций: патент на полезную модель 9001 Респ. Беларусь / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. Опубл. от 28.02.2013.
9. *Матис, И. Г.* Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. – Рига: Зинатне, 1982, 302 с.
10. *Бугров, А. В.* Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. – М.: Машиностроение, 1982, 94 с.
11. *Джексон, Р. Г.* Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.

Поступила в редакцию 10.03.2016