

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ № 3 2016
СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК

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

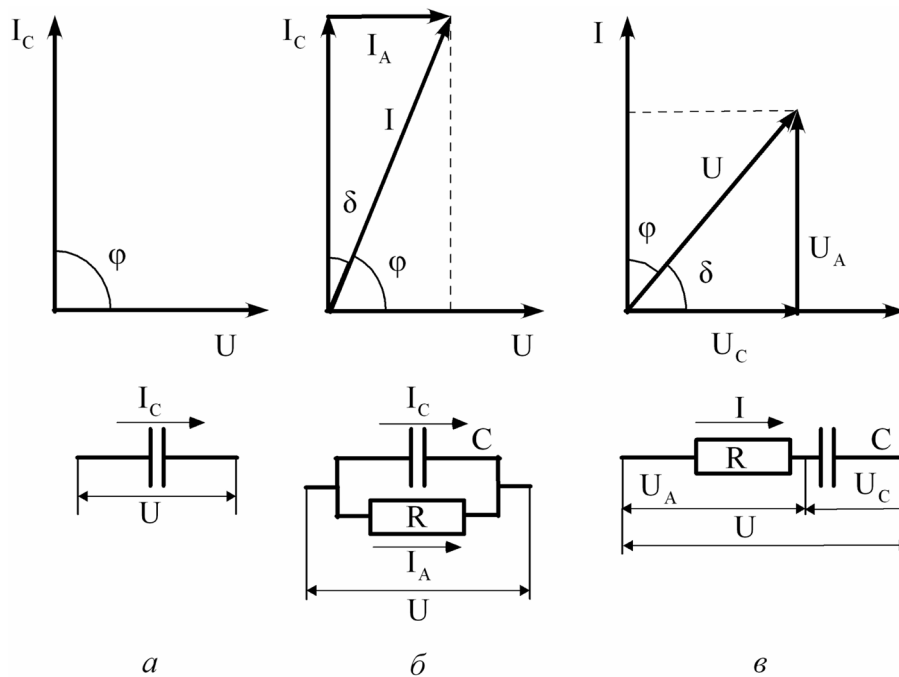


Рис. 1. Параметры эквивалентных схем конденсатора, замещенного диэлектриком с потерями: конденсатор без потерь (а), параллельная (б) и последовательная (в) схемы конденсатора, замещенного ЭМ с потерями

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 съемными контактами.

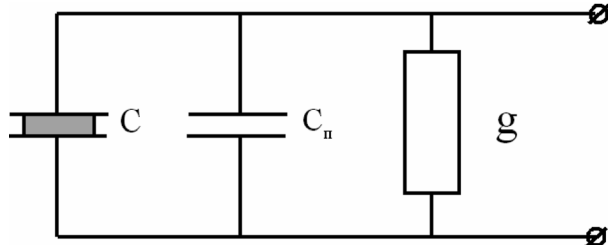


Рис. 2. Параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного ЭМ с потерями: g – активная электрическая проводимость ЭМ; $c_{\text{п}}$ – «паразитная» емкость конденсатора; $c = c_0\epsilon'$ – емкость конденсатора, замещенного ЭМ; c_0 – геометрическая емкость конденсатора; ϵ' – относительная диэлектрическая 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 $\pm 1,2\%$.

Т а б л и ц а 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