

УДК 533.275.08:543.712.08

В. И. Зубко, Д. В. Зубко, Г. Н. Сицко
Белорусский государственный университет

ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Разработан электроемкостный преобразователь для контроля и диагностики диэлектрических свойств полимерных композитов в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц. На основе анализа параллельной эквивалентной схемы конденсатора, замещенного материалом с потерями, получены формулы для вычисления комплекса диэлектрических показателей полимерных композитов.

Созданы электропроводящие полимерные композиты на основе переработанного вторичного полиэтилена. В качестве токопроводящих наполнителей служат порошкообразное углеродное волокно либо порошкообразная резина. Исследованы диэлектрические свойства композитов на основе переработанного вторичного полиэтилена в зависимости от содержания и типа наполнителя в диапазоне частоты электрического тока 100 Гц – 1 МГц.

Выбраны оптимальные частоты и составы, при которых максимальная удельная электропроводимость композитов на частоте 1 МГц достигает $1 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$. Проведен диагностический контроль относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов электроизоляционных материалов согласно нормам, регламентированным стандартом.

Ключевые слова: импедансный метод, полимерный композит, вторичный полиэтилен, порошкообразное углеродное волокно, порошкообразная резина.

V. I. Zubko, D. V. Zubko, G. N. Sitsko
Belarusian State University

THE IMPEDANCE METHOD AND MEANS OF CONTROL OF DIELECTRIC PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITES

The electro capacitive measuring cell for control and diagnostics of dielectric properties of polymeric composites in the range of frequencies 100 Hz – 1 MHz has been developed. On the basis of analysis of parallel equivalent chart of the condenser deputized by material with losses, formulas for the calculation of complex of dielectric indexes of polymeric composites have been obtained.

The electro-conducting polymeric composites on the basis of the processed secondary polyethylene have been created. As the conductive fillers the powdered carbon fiber or powdery rubber have been used. Dielectric properties of the composites on the basis of the recycled polyethylene depending on maintenance and type of filler in the range of frequency of electric current 100 Hz – 1 MHz have been researched.

The optimum frequencies and compositions under which the maximal specific conductivity of composites achieved the $1 \cdot 10^{-1} \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$ on frequency 1 MHz have been determined. The diagnostic control of the relative dielectric permittivity and tangent of the dielectric loss angle of samples of electrical insulating materials according to the norms regulated by the standard have been spent.

Key words: impedance method, polymeric composites, secondary polyethylene, powdery carbon fibre, powdery rubber.

Введение. По прогнозам Конференции ООН по окружающей среде и развитию, объемы твердых отходов к 2025 г. вырастут в 4–5 раз. По данным PlasticsEurope в 2008 г. объемы пластиковых отходов в Западной Европе составили 24,9 млн т. Опыт стран ЕС по контролю за образованием отходов показал, что между ростом валового внутреннего продукта и ростом отходов существует прямая зависимость. Общий объем переработки пластиковых отходов в ЕС в 2008 г. составил 51,3%. В среднем процентное соотношение переработки для вторичного использования составляет 21,3%, а сжигание с целью получения энергии – 30%. При этом необходимо учитывать, что в разных странах ситуация различна.

Стратегия переработки определила приоритет вторичной переработки и использования материала над сжиганием. Данный приоритет был закреплен в нескольких директивах Европейского сообщества. На практике, однако, принимаются меры, способствующие именно сжиганию отходов, а не переработке для повторного использования. В то время как, по данным PlasticsEurope, именно благодаря увеличению степени переработки, объемы депонируемых отходов остались неизменными. По данным PlasticsEurope в настоящее время в мире скопилось более 100 млн т автопокрышек, отработавших свой ресурс. Автопокрышки, вышедшие из эксплуатации, являются одним из самых многотоннажных

полимерных отходов потребления. Только в странах ЕС их количество превышает 30 млн т. При этом уровень их вторичного использования не превышает 5%. В то же время переработанная резина может быть использована в качестве токопроводящего наполнителя для получения композиционных материалов электротехнического назначения. Увеличение объема твердых отходов в мире делает актуальной задачу их утилизации и использования для производства новой продукции [1–4].

Получение композитов на основе переработанных полимерных отходов с различными токопроводящими наполнителями открывает перспективу использования их в качестве электропроводящих материалов. При этом эти материалы будут значительно дешевле, чем материалы на основе первичных полимеров [5, 6].

Электропроводящие материалы представляют собой композиты, в состав которых входят полимерное связующее и токопроводящий наполнитель. Анализ литературных данных показал, что удельная электропроводимость композитов недостаточна для изготовления электронагревательных элементов сопротивления, эластичных электродов и датчиков, гибких электрических экранов [7–8].

Задача решается созданием электропроводящих композитов с удельной электропроводимостью, достаточной для производства изделий электротехнического назначения. Полимерные композиты содержат в качестве связующего вторичный полиэтилен (ВПЭ), токопроводящими наполнителями являются порошкообразное углеродное волокно (ПУВ) либо порошкообразная резина (ПР), полученная из автомобильных шин, отработавших свой ресурс. Исследования электрических свойств созданных полимерных композитов проводились в зависимости от содержания и типа наполнителя в диапазоне частот электрического тока 100 Гц – 1 МГц. На основе полученных данных проводили выбор оптимальных частот электрического тока и составов, обеспечивающих достижение высокой удельной электропроводимости композитов, достаточной для производства изделий электротехнического назначения. Для решения поставленной задачи нами было создано два электропроводящих композита.

Первый полимерный композит содержит в качестве связующего вторичный полиэтилен низкой плотности, токопроводящим наполнителем является порошкообразное углеродное волокно при следующих соотношениях компонентов, мас. %: вторичный полиэтилен низкой плотности 50–90; порошкообразное углеродное волокно 10–50.

Второй полимерный композит содержит в качестве связующего вторичный полиэтилен

высокого давления, токопроводящим наполнителем является порошкообразная резина при следующих соотношениях компонентов, мас. %: вторичный полиэтилен высокого давления 15–75; порошкообразная резина 25–85.

Применение импедансного метода (ИМ) для контроля диэлектрических свойств материалов электротехнического назначения обусловлено необходимостью их тестирования на соответствие диэлектрических показателей, таких как относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ'), удельная электрическая проводимость (σ), тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), удельного объемного (ρ_v) и поверхностного (ρ_s) электрического сопротивления, нормам, регламентированным стандартами. Реализация ИМ позволяет эффективно использовать диэлектрические показатели для контроля и диагностики качества материалов электротехнического назначения (МЭН).

Цель данной статьи – создание электропроводящих полимерных композитов на основе вторичного полиэтилена с высокой удельной электропроводимостью, исследование закономерностей изменения электрических свойств композитов в зависимости от содержания и типа наполнителя в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц, выбор оптимальных частот электрического тока и составов, при которых достигается высокая удельная электропроводимость композитов, контроль и диагностика диэлектрических свойств электроизоляционных материалов.

В результате проведенных исследований нами установлено, что параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного материалом с потерями, более адекватно отражает реальные диэлектрические свойства материала в сравнении с последовательной эквивалентной схемой. На рис. 1 представлена параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного материалом с потерями.

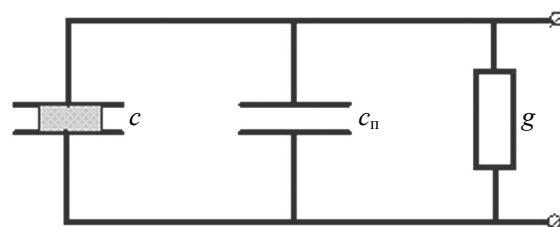


Рис. 1. Параллельная эквивалентная схема конденсатора, замещенного материалом с потерями: g – активная электрическая проводимость материала с потерями; c_n – «паразитная» электроемкость конденсатора и съемных контактов; $c = c_0\epsilon'$ – электроемкость конденсатора, заполненного материалом с потерями; c_0 – геометрическая емкость конденсатора; ϵ' – относительная диэлектрическая проницаемость материала

Импедансный метод основан на одновременном измерении величин полного сопротивления (z) и угла сдвига фаз между током и напряжением (φ) конденсатора, замещенного материалом с потерями, при протекании через него переменного электрического тока. Диапазон частоты электрического тока составляет 100 Гц – 1 МГц. На основе анализа параллельной эквивалентной схемы конденсатора, замещенного материалом с потерями, нами получены формулы для вычисления диэлектрических показателей, таких как ε' , $\operatorname{tg}\delta$, σ МЭН в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц.

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

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \cos|\varphi|}{c_0 z}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\cos|\varphi|}{z \omega \varepsilon' c_0}, \quad (3)$$

где z_0 – полное сопротивление конденсатора без материала; z – полное сопротивление конденсатора с материалом; φ – угол сдвига фаз между током и напряжением; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

С учетом краевых эффектов электродов из уравнения (1) получена формула для определения геометрической емкости измерительного пространства конденсатора:

$$c_0 = \frac{1}{\omega(\varepsilon_1 - 1)} \left(\frac{\sin \varphi_1}{z_1} - \frac{1}{z_0} \right), \quad (4)$$

где ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость эталонной пластины; φ_1 – угол сдвига фаз между током и напряжением при заполнении конденсатора эталонной пластиной; z_1 – полное сопротивление конденсатора с эталонной пластиной.

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

Электроемкостный преобразователь. На рис. 2 показана фотография разработанного нами высокочувствительного электроемкостного преобразователя для контроля и диагностики комплекса диэлектрических свойств МЭН [9]. Измерительная ячейка представляет собой конденсатор, образованный двумя дисковыми электродами, изготовленными из нержавеющей стали, поверхности которых отшлифованы, отполированы и хромированы. Распределение

напряженности электрического поля (особенно на краях образца и поля рассеяния) является сложной функцией от толщины и диэлектрической проницаемости образца. Погрешности измерения, обусловленные распределением напряженности электрического поля, могут быть исключены калибровкой измерительной ячейки с помощью эталонных пластин материалов с известной диэлектрической проницаемостью. В качестве вторичного прибора использован цифровой измеритель иммитанса.

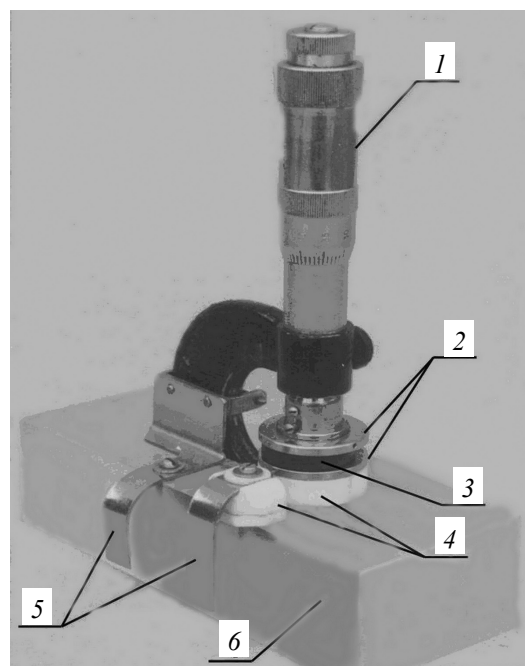


Рис. 2. Электроемкостный преобразователь контроля комплекса диэлектрических свойств МЭН: 1 – микрометрическое устройство; 2 – дисковые электроды; 3 – измерительное пространство; 4 – фторопластовые прокладки; 5 – съемные контакты; 6 – основание из оргстекла

Конструкция разработанного электроемкостного преобразователя по сравнению с известными аналогами [10–12] обладает следующими преимуществами:

- 1) получение информации о комплексе величин диэлектрических показателей (относительной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, удельного объемного электрического сопротивления) МЭН в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц;
- 2) обеспечение высокой степени параллельности между двумя электродами;
- 3) определение толщины пластин МЭН от 0,1 до 6,0 мм непосредственно в измерительном пространстве с точностью 0,005 мм;
- 4) обеспечение однородного электрического поля в контролируемом МЭН в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц;

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

6) высокое сопротивление изоляции прокладки 10^{16} – 10^{17} Ом.

Материалы, экспериментальные результаты и их обсуждение. Технология получения композитов на основе вторичного полиэтилена, в которых наполнителем служит ПУВ, состоит в следующем. На обогреваемые микровальцы помещают при температуре 115–120°C определенное количество ВПЭ в виде дробленки, к ней добавляют порциями ПУВ, далее смесь перемешивают в течение 5–7 мин до получения однородной массы. В результате из вальцевого полотна методом прессования на электрообогреваемом прессе при 160–170°C в течение 15–20 мин формируется пластина композита с заданными размерами. Аналогичные операции проводятся при использовании в качестве наполнителя ПР.

Результаты исследований показали характерное повышение удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ с возрастанием частоты при различном содержании ПУВ (рис. 3). Из рис. 4 видно, что при увеличении содержания ПУВ в композите от 20 до 50% значительные изменения на частоте 1 МГц претерпевает величина σ , повышается на четыре порядка – от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ Ом⁻¹·м⁻¹ [13].

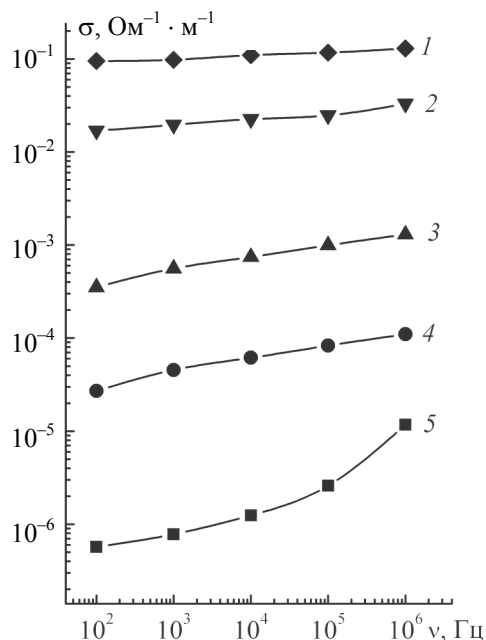


Рис. 3. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от частоты электрического тока ($t = 20^\circ\text{C}$): изменение σ , при ПУВ/ВПЭ = 50 (1), 40 (2), 30 (3), 20 (4), 10 (5) мас. %

Исследовано влияние содержания порошкообразной резины (ПР) на диэлектрические свойства

композитов на основе ВПЭ. Электропроводимость композита достигается путем введения в его состав углеродной (ацетиленовой) сажи. Из рис. 5, и рис. 6 видны характерное понижение величин ϵ и $\text{tg}\delta$, и возрастание значений σ композитов с увеличением частоты.

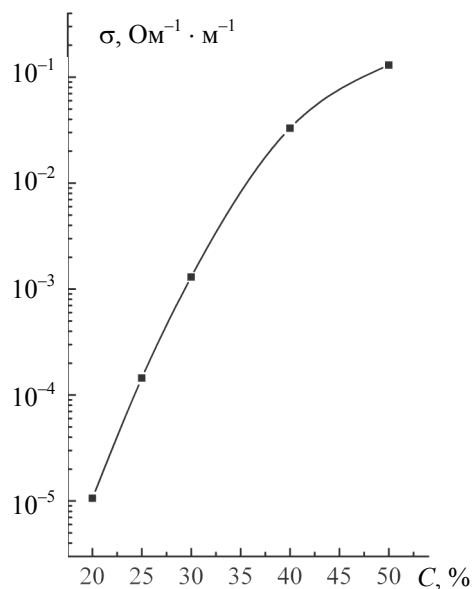


Рис. 4. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от содержания ПУВ (частота, на которой проводили измерения, составляла 1 МГц)

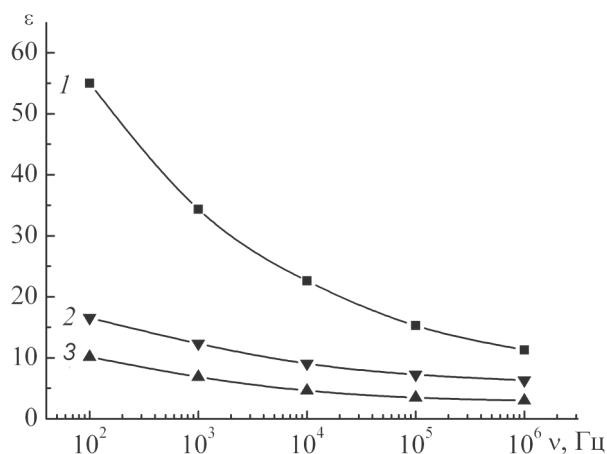


Рис. 5. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости композитов на основе ВПЭ от частоты электрического тока при различном содержании ПР ($t = 20^\circ\text{C}$), мас. %: 1 – 85; 2 – 50; 3 – 25

Наиболее значительные изменения величин ϵ композитов наблюдались в диапазоне частот электрического тока 10^2 – 10^5 Гц, тогда как зависимость σ композитов от частоты электрического тока при повышении содержания ПР носит практически линейный характер.

При повышении содержания ПР в композите от 50 до 85 мас. % наиболее информативными показателями на частоте 10² Гц является ϵ , тогда как на частоте 10⁶ Гц более значительные изменения претерпевает величина σ композитов.

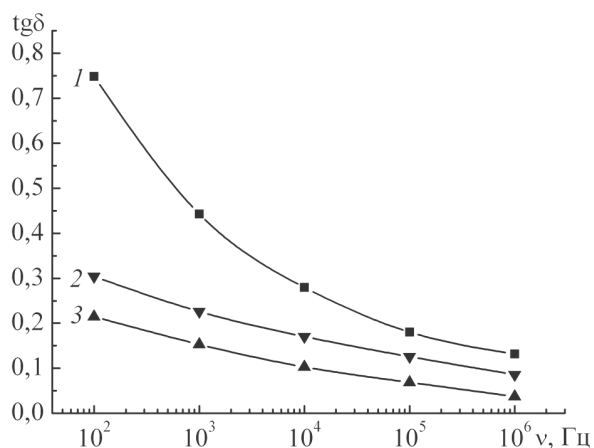


Рис. 6. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь композитов на основе ВПЭ от частоты электрического тока при различном содержании ПР ($t = 20\text{ }^\circ\text{C}$), мас. %:
1 – 85; 2 – 50; 3 – 25

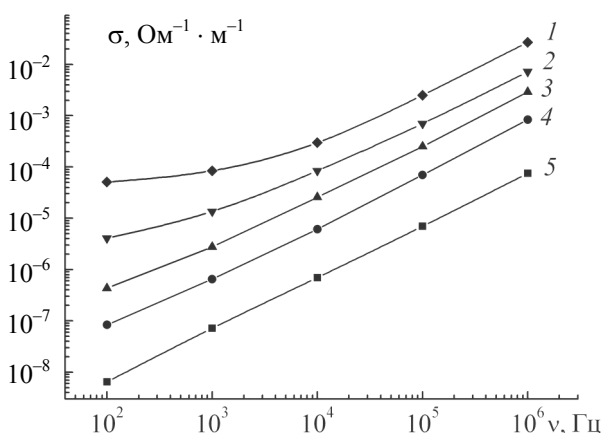


Рис. 7. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от частоты электрического тока при различном содержании ПР ($t = 20\text{ }^\circ\text{C}$), мас. %:
1 – 85; 2 – 70; 3 – 60; 4 – 50; 5 – 25

Из рис. 8 видно, что удельная электрическая проводимость при повышении содержания ПР в композите от 30 до 85 мас. % на частоте 1 МГц возрастает примерно на три порядка: от 10⁻⁵ до 10⁻² Ом⁻¹ · м⁻¹ [14].

Из полученных данных следует, что применение различных типов наполнителей позволяет на одной и той же полимерной основе получать ряд композитов с существенно отличающимися диэлектрическими свойствами. При этом в качестве полимерной основы может быть использован ВПЭ, наполненный различным токопроводящим наполнителем.

Проведен диагностический контроль показателей ϵ , $\text{tg}\delta$ образцов ЭМ на частоте электрического тока 1 МГц и ρ_v , ρ_s на постоянном токе при напряжении 500 В, согласно нормам, регламентированным стандартом.

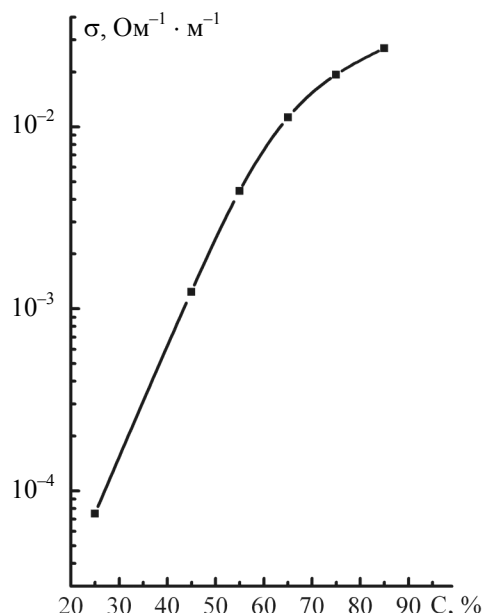


Рис. 8. Зависимость удельной электрической проводимости композитов на основе ВПЭ от содержания ПР (частота, на которой проводили измерения, составляла 1 МГц)

В таблице представлены среднестатистические значения диэлектрических показателей образцов ЭМ из пяти параллельных опытов при $(20 \pm 0,1)\text{ }^\circ\text{C}$. Относительная погрешность определения диэлектрических показателей образцов ЭМ составляет $\pm 1,2\%$.

В результате проведенных испытаний определены показатели относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов электроизоляционных материалов ДСВ, ГСП-8, Премикс МКП(Б)-20В на частоте 1 МГц, удельного объемного и поверхностного сопротивления на постоянном токе.

Установлено, что относительная диэлектрическая проницаемость образцов ДСВ находится в интервале 4,94–5,0, тангенс угла диэлектрических потерь составляет 0,017–0,025, удельное объемное сопротивление колеблется в пределах $2,95 \cdot 10^{10}$ – $3,2 \cdot 10^{10}$ Ом · м, поверхностное сопротивление составляет 1,55– $1,60 \cdot 10^{12}$ Ом, что соответствуют требованиям ГОСТ 17478–89, согласно которому данные показатели должны быть не более 8,0 и 0,05 и не менее $1,0 \cdot 10^{10}$ Ом · м и $1,0 \cdot 10^{12}$ Ом, соответственно.

Значения диэлектрических показателей образцов электроизоляционных материалов

Электроизоляционный материал ДСВ-2		
Диэлектрический показатель	Определяемый показатель	
ϵ'	4,970	По ГОСТ 17478–95
		Не более 8,0
$\text{tg}\delta$	0,022	Не более 0,05
ρ_v	$3,08 \cdot 10^{10}$ Ом · м	Не менее 10^{10} Ом · м
ρ_s	$1,60 \cdot 10^{12}$ Ом	Не менее 10^{12} Ом
Электроматериал ГСП-8		
ϵ'	4,92	По ГОСТ 17478–95
		Не более 7,0
$\text{tg}\delta$	0,026	Не более 0,04
ρ_v	$1,48 \cdot 10^{10}$ Ом · м	Не менее 10^{10} Ом · м
ρ_s	$1,60 \cdot 10^{12}$ Ом	Не менее 10^{12} Ом
Премикс МКП(Б)-20В		
ρ_v	$5,43 \cdot 10^{11}$ Ом · м	ТУ 2253-001-45804463-2007 Не менее 10^{11} Ом · м
ρ_s	$5,28 \cdot 10^{13}$ Ом	Не менее 10^{13} Ом

Относительная диэлектрическая проницаемость образцов ГСП-8 находится в интервале 4,65–5,3, тангенс угла диэлектрических потерь составляет 0,023–0,028, удельное объемное сопротивление колеблется в пределах $1,35 \cdot 10^{10}$ – $1,6 \cdot 10^{10}$ Ом · м, поверхностное сопротивление составляет 1,55– $1,65 \cdot 10^{12}$ Ом, что соответствуют требованиям ГОСТ 17478–95, согласно которому определяемые показатели должны быть не более 7,0 и 0,04 и не менее $1,0 \cdot 10^{10}$ Ом · м и $1,0 \cdot 10^{12}$ Ом, соответственно.

Удельное объемное электрическое сопротивление образцов Премикс МКП(Б)-20 В колеблется в пределах $5,20 \cdot 10^{11}$ – $5,6 \cdot 10^{11}$ Ом·м, поверхностное сопротивление составляет $5,10$ – $5,40 \cdot 10^{13}$ Ом, что соответствуют требованиям ТУ 2253-001-45804463-2007, согласно которому данные показатели должны быть не менее $1,0 \cdot 10^{11}$ Ом · м и $1,0 \cdot 10^{13}$ Ом, соответственно.

Заключение. На основе анализа параллельной эквивалентной схемы конденсатора, замещенного материалом с потерями, получены формулы для вычисления комплекса диэлектрических показателей полимерных композитов. Разработан электроемкостный преобразователь, созданы электропроводящие полимерные композиты на основе переработанного вторичного полиэтилена. В качестве токопроводящих наполнителей служат порошкообразное углеродное волокно либо порошкообразная

резина с достигнутой высокой удельной электропроводимостью композитов. Установлены закономерности изменения диэлектрических свойств композитов в зависимости от содержания и типа наполнителя, подобраны оптимальная частота электрического тока и составы, обеспечивающие высокую удельную электропроводимость композитов. Проведен диагностический контроль относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов электроизоляционных материалов на частоте 1 МГц, согласно нормам, регламентированным стандартом.

Импедансный метод и средства контроля, которыми располагает лаборатория диэлектрической спектроскопии гетерогенных систем Белорусского государственного университета, в дальнейшем могут быть использованы для диагностического контроля диэлектрических свойств полимерных композитов и электроизоляционных материалов на их соответствие нормам, регламентированным стандартами. Это позволит проводить диагностический контроль и своевременно выявлять соответствие или несоответствие диэлектрических показателей полимерных композитов и электроизоляционных материалов, применяемых в высоковольтных электрических и радиотехнических устройствах.

Литература

1. Киселенко В. В. Комплексный подход – ключ к переработке 95% отходов // Твердые бытовые отходы. 2012. № 10. С. 26–27.

2. Рябов Г. А., Санкин Д. А., Ханеев К. В. Сжигание топлив в химических циклах с сепарацией CO₂ // *Энергетик*. 2009. № 3. С. 14–17.
3. Перспективы и проблемы использования биомассы и отходов для производства тепла и электроэнергии / Рябов Г. А. [и др.] // *Теплоэнергетика*. 2006. № 7. С. 61–66.
4. Липик В. Т., Прокопчук Н. Р. Рециклинг и утилизация полимерных отходов. Минск: БГТУ, 2008. 289 с.
5. Наполнители для полимерных композиционных материалов / под ред. Г. С. Каца, Д. Милевского. М.: Химия, 1981. 736 с.
6. Современные композиционные материалы / под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М.: Мир, 1970. 325 с.
7. Электрические свойства полимеров / под ред. Э. Блайт, Д. Блур. М.: Физматлит, 2008. 235 с.
8. Agary Y., Ueda A., Nagai S. Electrical and Thermal Conductivities of Polyethylene Composites Filled with Biaxial Oriented Short-Cut Carbon Fibers // *Journal of Applied Polymer Science*. 1994. Vol. 52. № 9. P. 1223–1231.
9. Устройство для измерения электрических свойств полимерных композиций: пат. 9001 Респ. Беларусь / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. № u 20120669; заяв. 07.10.12; опубл. 28.03.13. № 2. С. 46.
10. Матис И. Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1982. 256 с.
11. Бугров А. В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. М.: Машиностроение, 1984. 94 с.
12. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
13. Электропроводящая полимерная композиция: пат. 11018 Респ. Беларусь / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. № а 20070558; заяв. 14.05.07; опубл. 30.08.08. № 3. 45 с.
14. Электропроводящая полимерная композиция: пат. 13803 Респ. Беларусь / Д. В. Зубко, В. И. Зубко. № а 20081339; заяв. 23.10.10; опубл. 30.12.10. № 4. 35 с.

References

1. Kiselenko V. V. The complex approach is the key to processing of 95% waste. *Tverdye bytovye otkhody* [The domestic solid wastes], 2012, no. 10, pp. 26–27 (In Russian).
2. Ryabov G. A., Sankon, D. A., Haneev K. V. Burning of fuel in chemical cycles with CO₂. *Energetik* [Energetics], 2009, no. 3, pp. 14–17 (In Russian).
3. Ryabov G. A., Litun D. S., Disk E. P., Zemskov K. A. Prospects and problems of using biomass and waste for the production of heat and electric power. *Teploenergetika* [Heat power engineering], 2006, no. 7, pp. 61–66 (In Russian).
4. Lipik V. T., Prokopchuk N. R. *Retsikling i utilizatsiya polymernykh otkhodov* [Recycling and utilization of polymeric wastes]. Minsk, BGTU Publ., 2008. 136 p.
5. *Napolniteli dlya polimernykh kompozitnykh materialov* [The fillers for polymeric materials]. Ed.: G. S. Kaz, D. Mylevsky. Moscow, Chemistry Publ., 1981. 736 p.
6. *Sovremennye kompozitnye materialy* [Modern composition materials]. Ed.: L. Brautman, R. Krok. Moscow, Mir Publ., 1970. 325 p.
7. *Elektricheskie svoystva polimerov* [Electric properties of polymers]. Ed.: E. Blite, D. Blur. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 235 p.
8. Agary Y., Ueda A., Nagai S. Electrical and Thermal Conductivities of Polyethylene Composites Filled with Biaxial Oriented Short-Cut Carbon Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1994, vol. 52, no. 9, pp. 1223–1231.
9. Zubko D. V., Zubko V. I. *Ustroystvo dlya izmereniya elektricheskikh svoystv polimernykh kompozitsiy* [The device for measuring of electrical properties of polymer compositions]. Patent BY, no. u 20120669, 2013.
10. Matis I. G. *Elektroemkostnye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya* [Electrocapacity transducers for non-destructive control]. Riga, Zinatne Publ., 1982. 302 p.
11. Bugrov A. V. *Vysokochastotnye emkostnye preobrazovateli i pribory kontrolya kachestva* [The High-frequency capacity transducers and devices for control of quality]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 94 p.
12. Jackson R. G. *Noveyshie datchiki* [The Newest sensors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 384 p.

13. Zubko D. V., Zubko V. I. *Elektroprovodyashchaya polimernaya kompozitsiya* [Electro-conducting polymeric composition]. Patent BY, no. 11018, 2008.

14. Zubko D. V., Zubko V. I. *Elektroprovodyashchaya polimernaya kompozitsiya* [Electro-conducting polymeric composition]. Patent BY, no. 11018, 2012.

Информация об авторах

Зубко Василий Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией диэлектрической спектроскопии гетерогенных систем. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: v.i.zubko@tut.by

Зубко Денис Васильевич – старший научный сотрудник лаборатории диэлектрической спектроскопии гетерогенных систем. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: v.i.zubko@tut.by

Сицко Геннадий Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 2, Республика Беларусь). E-mail: gensitsko@yandex.ru

Information about the authors

Zubko Vasiliy Ivanovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Laboratory of Dielectric Spectroscopy of the Heterogeneous Systems (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.i.zubko@tut.by

Zubko Denis Vasilievich – Senior Researcher, the Laboratory of Dielectric Spectroscopy of the Heterogeneous Systems. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.i.zubko@tut.by

Sitsko Gennady Nikolaevich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, the Department of Theoretical and Applied Mechanics. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gensitsko@yandex.ru

Поступила 27.10.2017