

# I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 532.9

Золотаревский А. И.,<sup>1</sup> Луцин С. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ст. лаборант кафедры физики ЗНТУ, Запорожье, Украина

<sup>2</sup>Канд. физ.-матем. наук, доцент кафедры физики ЗНТУ, Запорожье, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕКОТОРЫХ ПОЛЯРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ДИАПАЗОНЕ НИЗКИХ ЧАСТОТ

**Цель работы.** Исследовать спектральную зависимость диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков с различной степенью упаковки кристаллической структуры в диапазоне низких частот.

**Методы исследований.** Для получения спектральной зависимости диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков использовалась методика определения емкости конденсатора, между обкладками которого размещался исследуемый образец. По полученному значению емкости конденсатора вычислялось значение диэлектрической проницаемости образца.

**Полученные результаты.** Авторами были получены спектральные зависимости диэлектрической проницаемости материалов, обладающих разной степенью упаковки кристаллической решетки. Математическая обработка полученных экспериментальных результатов позволила установить линейный характер спектральной зависимости в логарифмических координатах. На основании этого предложена степенная функция, удовлетворительно описывающая спектральные зависимости диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков в области низких частот.

**Научная новизна.** Авторами численно определен степенный коэффициент  $\alpha$ , который зависит от природы диэлектрика и его можно рассматривать в качестве критерия плотности упаковки кристаллической решетки полярных диэлектриков.

**Практическая значимость.** Результаты исследований могут быть использованы для изучения механизма поляризации полярных диэлектриков, эксплуатируемых в электротехнических изделиях при воздействии переменных электрических полей различных частот.

**Ключевые слова:** спектральная зависимость, диэлектрическая проницаемость, полярные диэлектрики, диапазон низких частот.

### ВВЕДЕНИЕ

Поляризация диэлектриков в электрическом поле представляет особый интерес для исследования ввиду практического использования ряда эффектов, возникающих при этом процессе. Например, существует проблема расчета и измерения электрической емкости и угла диэлектрических потерь изоляционных материалов высоковольтных аппаратов при диагностике в условиях высокого уровня эксплуатационных помех в диапазоне частот выше 100 кГц [1,2]. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию поляризации полярных диэлектриков, которые обладают дипольной (ориентационной) поляризацией. Определенный интерес для исследования поляризации диэлектрических материалов представляет область низких частот, при которых происходит уменьшение диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков до насыщения, т.е. в области дисперсии диэлектрической проницаемости.

### АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Ранние работы были посвящены исследованию поляризации диэлектриков в зависимости от их химической природы. В дальнейшем большой вклад в развитие

теории полярных диэлектриков был сделан П. Дебаем. Согласно теории Дебая молекулярные диполи ориентируются в направлении электрического поля, и полярные молекулы приобретает некоторую упорядоченность [3].

Спектральные зависимости диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков могут быть описаны уравнением Дебая [3]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})}{1 + i\omega\tau}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\infty}$  – диэлектрическая проницаемость при частотах  $\omega \rightarrow \infty$ ;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость при частоте  $\omega \rightarrow 0$ ;  $i$  – мнимая единица;  $\omega$  – частота внешнего электрического поля;  $\tau$  – время релаксации.

С увеличением частоты в области низких частот диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков остается постоянной до тех пор, пока время релаксации дипольных молекул остается меньше полупериода приложенного электрического поля. За это время молекулярные диполи успевают ориентироваться по полю. При увеличении частоты диэлектрическая проницаемость

уменьшается вплоть до значений, определяемых электрической поляризацией. При более высоких частотах дипольная поляризация отсутствует, так как молекулярные диполи не успевают ориентироваться в электрическом поле [3–5].

В последнее время получил значительное развитие метод диэлектрической спектроскопии, который позволяет получить обширную информацию о молекулярной структуре, кинетике и механизме молекулярных процессов в электрических полях [6].

Кислородосодержащие керамические материалы со структурой перовскита, в частности цирконат-титанат свинца, характеризуются комплексом специфических электрофизических свойств и занимают особое место в современной электротехнике и электронике. Они имеют достаточно высокие значения диэлектрической проницаемости, способны легко поляризоваться в электрическом поле вследствие значительной подвижности поверхностных атомов в кристаллической решетке [7, 8]. Изучение механизма поляризации таких керамических диэлектриков, эксплуатируемых в электротехнических изделиях при воздействии переменных электрических полей различных частот представляет особый интерес ввиду их широкого практического использования.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Для изучения процессов поляризации полярных диэлектриков была поставлена задача исследовать спектральную зависимость диэлектрической проницаемости некоторых полярных диэлектриков с различной плотностью упаковки кристаллической решетки в диапазоне низких частот. Изучение характера изменения диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков в этой области частот дает возможность судить о вероятном механизме протекающих процессов при поляризации полярных диэлектрических материалов.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нами исследовалась спектральная зависимость диэлектрической проницаемости воды в жидком и кристаллическом состояниях, а также сильно полярного диэлектрика на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца (керамика ЦТС-22) в диапазоне низких частот. Для измерений диэлектрической проницаемости была выбрана схема, позволяющая определить емкость конденсатора, между обкладками которого размещался исследуемый образец. Тангенс диэлектрических потерь не учитывался [6].

Для проведения эксперимента использовалась экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Экспериментальная установка состояла из генератора переменного тока, ячейки для измерения емкости, диодных мостиков, вольтметра и микроамперметра.

Частота генератора менялась от 200 Гц до 20 кГц. Напряжение генератора составляло 80 В.

Из рисунка 1 видно, что от генератора переменный электрический ток подавался на ячейку для измерения емкости, которая представляла собой конденсатор, между обкладками которого помещался образец. Обкладки конденсатора были изготовлены из алюминиевой фольги. Для воды использовалась емкость, на поверхности которой располагались обкладки конденсатора. Для льда также использовалась аналогичная емкость. В обоих случаях обкладки конденсатора представляли собой алюминиевую фольгу размерами 140x200 мм. На поверхность керамики ЦТС по промышленной технологии были нанесены серебряные электроды. Образец керамики представлял собой диск толщиной 5 мм и диаметром 50 мм. Величину напряжения и тока на обкладках конденсатора после выпрямления диодными мостиками измеряли с помощью вольтметра и микроамперметра соответственно. Для расчетов использовалась формула плоского конденсатора. Из экспериментальных данных находилось реактивное сопротивление, после этого, зная частоту переменного тока, находилась емкость конденсатора и диэлектрическая проницаемость льда, воды и керамики ЦТС-22.

На рисунках 2 и 3 приведены спектральные зависимости диэлектрической проницаемости воды в жидком и кристаллическом состояниях, а также керамики ЦТС-22.

Анализ полученных спектральных зависимостей диэлектрической проницаемости показал, что для всех трех исследованных полярных диэлектриков в диапазоне частот от 200 Гц до 1 кГц диэлектрическая проницаемость монотонно уменьшалась. При достижении значения частоты 1 кГц уменьшение диэлектрической проницаемости исследованных диэлектриков прекращалось, и при частотах  $\omega > 1$  кГц она выходила на насыщение (рисунки 2, 3).

Характер зависимости диэлектрической проницаемости от частоты электрического поля был исследован методом построения графиков в логарифмических координатах.

На рис. 4 приведены спектральные зависимости диэлектрической проницаемости воды в жидком и кристаллическом состояниях, а также керамики ЦТС-22 в логарифмических координатах, т.е.  $\ln \epsilon = f(\ln \omega)$ .

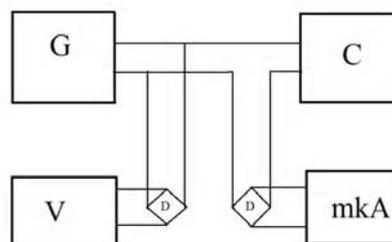


Рисунок 1 – схема экспериментальной установки. G – генератор, C – ячейка для измерения емкости, D – диодные мостики, V – вольтметр, mkA – микроамперметр

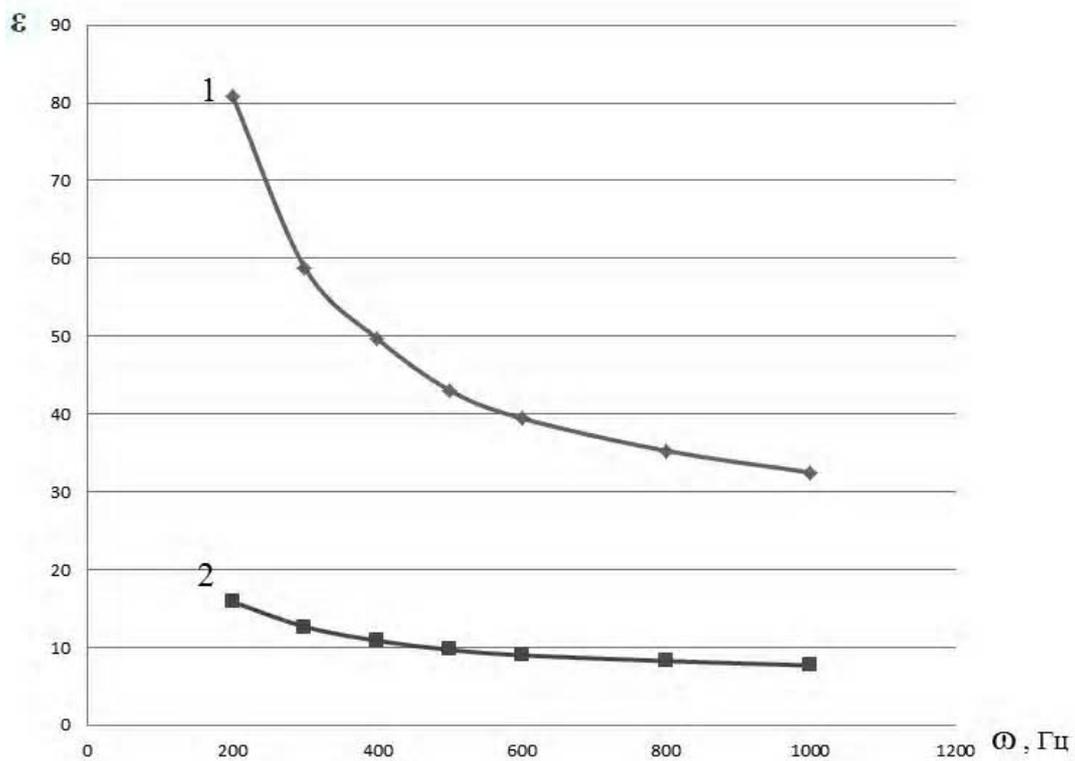


Рисунок 2 – зависимость диэлектрической проницаемости от частоты, 1 – вода, 2 – лед

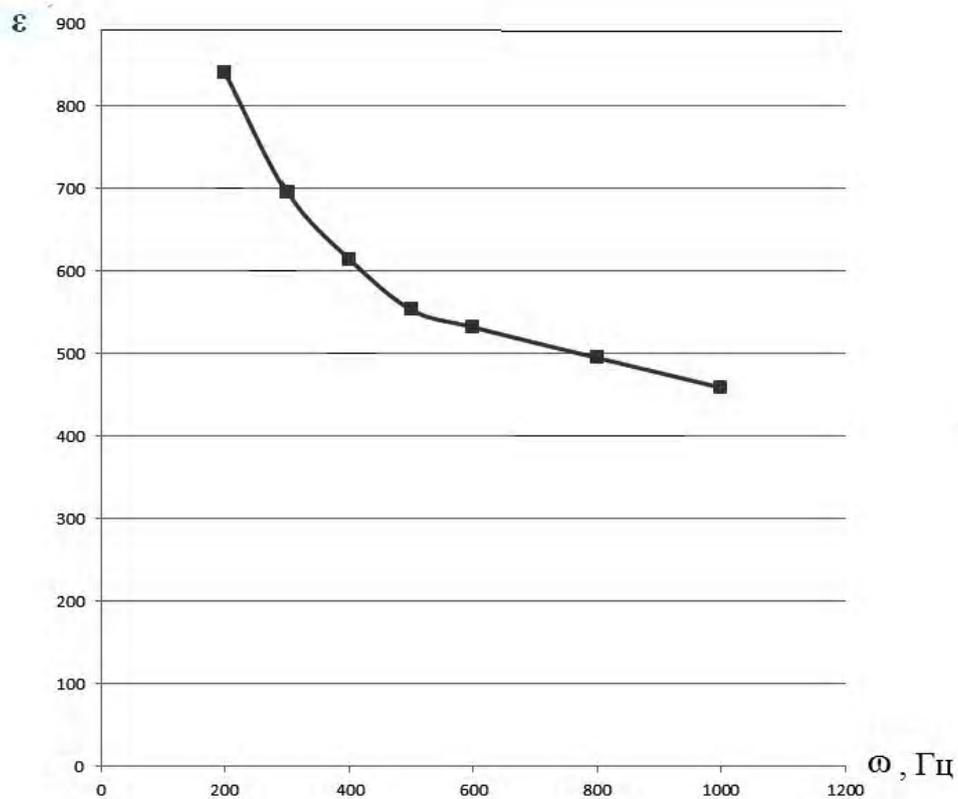


Рисунок 3 – зависимость диэлектрической проницаемости от частоты керамики ЦТС-22

Анализ полученных спектральных зависимостей диэлектрической проницаемости исследованных материалов в логарифмических координатах показывает, что в области низких частот они имеют линейный характер и удовлетворительно описываются линейной функциональной зависимостью:

$$\ln \varepsilon = \ln \varepsilon_0 - \alpha \ln \omega, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала;  $\varepsilon_0$  – статическая диэлектрическая проницаемость материала при частоте  $\omega = 0$ ;  $\alpha$  – степенной коэффициент;  $\omega$  – частота электрических колебаний.

Отсюда следует, что полученные спектральные зависимости диэлектрической проницаемости исследованных материалов в области низких частот (рис. 2, 3) могут быть представлены в виде степенной функции:

$$\varepsilon = k\omega^{-\alpha}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Значение коэффициента пропорциональности равно статической диэлектрической проницаемости материала при частоте .

Ввиду того, что вода является сильно полярной жидкостью, дипольные моменты ее молекул способны поворачиваться в электрическом поле, в результате чего возникает дипольная поляризация. При частоте диэлектрическая проницаемость воды . С увеличением частоты электрического поля  $\varepsilon$  уменьшается, достигая значения при кГц.

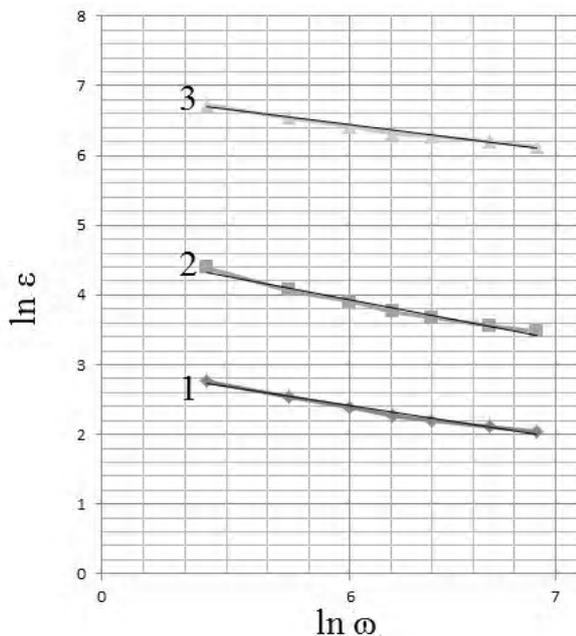


Рисунок 4 – спектральные зависимости диэлектрической проницаемости 1-льда, 2-воды и 3-керамики ЦТС-22 в логарифмических координатах

Согласно современным представлениям структурным элементом воды является тетраэдр из четырех молекул, связанных между собой водородными связями [9]. Энергия водородной связи, меняющаяся в пределах от 0,2 до 0,3 эВ во льду и уменьшающаяся до 0,06 эВ в воде, существенно меньше других видов внутримолекулярных энергий [10].

Характер полученной спектральной зависимости диэлектрической проницаемости воды можно объяснить тем, что при низких частотах молекулы  $H_2O$ , связанные между собой водородными связями, успевают реагировать на изменение частоты и их дипольные моменты ориентируются по полю. При более высоких частотах ориентация дипольных моментов  $H_2O$  не успевает происходить из-за высокой скорости изменения электрического поля и поэтому диэлектрическая проницаемость уменьшается.

В кристаллическом состоянии вода (лед) имеет меньшее значение диэлектрической проницаемости, а характер спектральной зависимости  $\varepsilon$  имеет такой же вид, как и для жидкого состояния. В этом случае наблюдается дипольная поляризация ввиду «неплотной» упаковки молекул, так как плотность льда меньше чем у воды [11].

Для сравнения нами была получена спектральная зависимость диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика, являющегося сегнетоэлектриком – керамики ЦТС-22. Значение диэлектрической проницаемости составили  $\varepsilon_0 = 850$ ,  $\varepsilon_\infty = 450$ . Высокая поляризуемость керамики ЦТС обусловлена существованием наряду с электронной и ионной еще и дипольной доменной поляризацией [12–14]. Керамика ЦТС представляет собой ионный кристалл с плотноупакованной кристаллической решеткой со структурой перовскита [14–16]. Энергия связи в таких кристаллах на порядок превышает энергию водородной связи и достигает 5–10 эВ.

Математическая обработка полученных спектральных зависимостей с использованием логарифмических координат позволила получить уравнение (3), удовлетворительно описывающее такие зависимости. В этом уравнении степенной коэффициент  $\alpha$ , который зависит от природы диэлектрика, может рассматриваться как характерный параметр, обратно зависящий от плотности упаковки кристаллической решетки диэлектрика. Значение  $\alpha$  для воды, льда и керамики ЦТС составило 0,57; 0,46; 0,38 соответственно. Чем выше плотность упаковки кристаллической решетки, тем меньше значение коэффициента .

## ВЫВОДЫ

1. Спектральные зависимости диэлектрической проницаемости исследованных полярных диэлектриков в области низких частот в логарифмических координатах имеют линейный характер.

2. Спектральные зависимости диэлектрической проницаемости исследованных полярных диэлектриков в области низких частот удовлетворительно описываются степенной функциональной зависимостью.

3. Степенной коэффициент  $\alpha$  зависит от природы диэлектрика и может рассматриваться как характерный параметр, обратно зависящий от плотности упаковки кристаллической решетки диэлектрика.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малюшевська А. П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короткочасної електричної міцності / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров // Електротехніка і електроенергетика. – 2016. – №1. – С. 18–24. DOI 10.15588/1607-6761-2016-1-3
2. Малюшевська А. П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових експлуатаційних системах / А. П. Малюшевська, О. Я. Дмитрішин, С. О. Топоров // Електротехніка і електроенергетика. – 2015. – №1. – С. 18–24. DOI 10.15588/1607-6761-2015-1-3
3. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
4. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков / К.: Вища школа, 1980. – 400 с.
5. Рез И. С. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике / И. С. Рез, Ю. М. Поплавко. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
6. Гусев Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие / Ю. А. Гусев. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2008. – 112 с.
7. Александров К. С. Перовскиты, настоящее и будущее / К. С. Александров, Б. В. Безносиков. – Новосибирск: Изд-во Сиб. Отд-ние РАН, 2004. – 230 с.
8. Bell A. J. Ferroelectrics: The role of ceramic Sci. and engineering / A. J. Bell // J. Eur. Ceram. Soc. – 2008. – Vol. 28. – P. 1307–1317.
9. Эйзенберг Д. Структура и свойства воды / Д. Эйзенберг, Кацман В. –Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
10. Доронин Ю. П. Физика океана / Ю. П. Доронин. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2010. – 274 с.
11. Тонконогов М. П. Диэлектрическая спектроскопия кристаллов с водородными связями. Протонная релаксация / М. П. Тонконогов // УФН. – 1998. – Т. 168, №1. – С. 29–54.
12. Фесенко Е. Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество / Е. Г. Фесенко. – М.: Атомиздат, 1972. – 248 с.
13. Galasso F. S. Structure properties and Preparation of Perovskite-type Compounds / F/S/ Galasso-New York: Pergamon Press, 1969. – 364 p.
14. Веневцов Ю. Н. Сегнетоэлектрики / Ю. Н. Веневцов. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. Ун-та, 1968. – С. 155.
15. Лайнс М. Сегнетоэлектрики и родственные материалы / М. Лайнс, А. Глас.-М.: Мир, 1981. – 736 с.
16. Смоленский Г. А. Физика сегнетоэлектрических явлений / Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов [и др.]-Л.: Наука, 1985. – 396 с.

Статья поступила в редакцию 26.04.17

Zolotarevskiy A. I.<sup>1</sup>, Lushchin S. P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Senior laboratorian of physics chair, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

<sup>2</sup>Associate Professor of physics department, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

### THE STUDY OF THE SPECTRAL RELATIONSHIP OF THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF POLAR DIELECTRICS IN THE LOW FREQUENCY RANGE

**The purpose of the work.** Research of the spectral dependance of the dielectric permittivity of polar dielectrics with different degree of packing of the crystal structure in the low frequency range.

**Research methods.** To obtain the spectral dependance of the dielectric permittivity of polar dielectrics used method of determining the capacitance of the capacitor, between the plates which are placed the sample under study. According to the received capacity value of the capacitor calculated value of the dielectric constant of the sample.

**The results obtained.** The authors obtained spectral dependance of the dielectric permittivity of dielectric materials with different degree of packing of the crystal lattice. Mathematical processing of the obtained experimental results allowed to establishing the linear character of the spectral dependance in logarithmic coordinates. Based on this proposed a power function adequately describing the spectral dependance of the dielectric permittivity of polar dielectrics at low frequencies.

**Scientific novelty.** The authors numerically determined power-law coefficient  $\alpha$ , which depends on the nature of the dielectric and it can be regarded as a criterion of the packing density of the crystal lattice of the polar dielectrics.

**Practical significance.** The research results can be used to study the mechanism of polarization of polar dielectrics, used in electrical products under the influence of alternating electric fields of different frequencies.

**Key words:** spectral dependance, dielectric permittivity, polar dielectrics, the low-frequency range.

Золотаревський О. І.<sup>1</sup> Лушчин С. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ст. лаборант кафедри фізики, Запорізький національний технічний університет, Україна

<sup>2</sup>Доцент кафедри фізики, Запорізький національний технічний університет, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ДЕЯКИХ ПОЛЯРНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ У ДІАПАЗОНІ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

**Мета роботи.** Дослідити спектральну залежність діелектричної проникності полярних діелектриків з різним ступенем упаковки кристалічної структури у діапазоні низьких частот.

**Методи досліджень.** Для отримання спектральної залежності діелектричної проникності полярних діелектриків використовувалася методика визначення ємності конденсатора, між обкладками якого розміщувався досліджуваний зразок. За отриманим значенням ємності конденсатора обчислювалося значення діелектричної проникності зразка.

**Отримані результати.** Авторами були отримані спектральні залежності діелектричної проникності діелектричних матеріалів з різним ступенем упаковки кристалічної решітки. Математична обробка отриманих експериментальних результатів дозволила встановити лінійний характер спектральної залежності в логарифмічних координатах. На підставі цього запропоновано степенева функція, що задовільно описує спектральні залежності діелектричної проникності полярних діелектриків в області низьких частот.

**Наукова новизна.** Авторами чисельно визначено степеневий коефіцієнт  $\alpha$ , який залежить від природи діелектрика і його можна розглядати як критерій щільності упаковки кристалічної решітки полярних діелектриків.

**Практична значимість.** Результати досліджень можуть бути використані для вивчення механізму поляризації полярних діелектриків, що експлуатуються в електротехнічних виробках при дії змінних електричних полів різних частот.

**Ключові слова:** спектральна залежність, діелектрична проникність, полярні діелектрики, діапазон низьких частот.

## REFERENCES

1. Maljushevs'ka, A. P., Toporov, S. O. (2016). Vpliv skladu i morfologii kondensatornih polimernih plivok na termostabil'nist' ih korotkochasnoi elektrichnoi micnosti. *Jelektrotehnika i jelektrojenergetika*, 1, 18–24. DOI 10.15588/1607-6761-2016-1-3
2. Maljushevs'ka, A. P., Dmitrishin, O. Ja., Toporov, S. O. (2015). Doslidzhennja vplivu pidvishhenih temperatur na ekspluatacijni vlastivosti transformatornogo masla T-1500 v plivkovih ekspluatacijnih sistemah. *Jelektrotehnika i jelektrojenergetika*, 2015, 1, 18–24. DOI 10.15588/1607-6761-2015-1-3
3. Tareev, B. M. (1982). *Fizika dijelektricheskikh materialov*. Moscow, Jenergoizdat, 320.
4. Poplavko, Ju. M. (1980). *Fizika dijelektrikov*. Kiev, Vishha shkola, 400.
5. Rez, I. S., Poplavko, Ju. M. (1989). *Dijelektriki. Osnovnye svojstva i primenenie v jelektronike*. Moscow, Radio i svjaz', 288.
6. Gusev, Ju. A. (2008). *Osnovy dijelektricheskoi spektroskopii: ucheb. Posobie*. Kazan': Kazan. gos. un-t, 112.
7. Aleksandrov, K. S., Beznosikov, B. V. (2004). *Perovskity, nastojashhee i budushhee*. Novosibirsk: Izd-vo Sib. Otd-nie RAN, 230.
8. Bell, A. J. (2008) *Ferroelectrics: The role of ceramic Sci. and engineering*. *Ceraam, Soc*, 28, 1307–1317.
9. Jeizenberg, D., Kacman, V. (1975). *Struktura i svojstva vody*. Sankt-Peterburg, Gidroieteoizdat, 280 s.
10. Doronin, Ju. P. (2010). *Fizika okeana*. Sankt-Peterburg, Gidrometeoizdat, 274.
11. Tonkonogov, M. P. (1998). *Dijelektricheskaja spektroskopija kristallov s vodorodnymi svjazjami. Protonnaja relaksacija*, UFN, 168, 1, 29–54.
12. Fesenko, E. G. (1972). *Semejstvo perovskita i segnetojelektrichestvo*. Moscow, Atomizdat, 248.
13. Galasso, F. S. (1969). *Structure properties and Preparation of Perovskite-type Compounds / F/S/ Galasso-New York, Pergamon Press, 1969, 364.*
14. Venevcov, Ju. N. (1968). *Segnetojelektriki*. Rostov-na-Don, Izd-vo Rost. Un-ta, 155.
15. Lajns, M., Glas, A. (1981). *Segnetojelektriki i rodstvennye materialy*. Moscow, Mir, 736.
16. Smolenskij, G. A., Bokov, V. A. (1985). *Fizika segnetojelektricheskikh javlenij*. Isupov, Sankt-Peterburg, Nauka, 396.