

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.7>

УДК 678.438.  
47.2

САВЧЕНКО Б. М., СОВА Н. В., ХОМЕНКО В. Г., СЛЄПЦОВ О. О.,  
БУЛГАКОВ Є. С., СЛЄПЧЕНКО Р. Ю.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ СТВОРЕННІ МЕТАМАТЕРІАЛІВ З РЕГУЛЬОВАНИМИ ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

**Мета дослідження.** Метою даної статті є дослідження впливу програмованої просторової структури розподілу матеріалів, отриманих методом адитивного виробництва на їх діелектричні властивості.

**Методи дослідження.** Дослідження діелектричних характеристик дослідних зразків здійснювалось шляхом вимірювання їх ємності та тангенса кута діелектричних втрат з використанням пристрою RLC-метр DER EE LCR METER DE-5000 за 4-х електродною схемою з додатковим контактним пристроєм TL-21. Вимірювання проводились із застосуванням змінного струму та вимірювальних частот 100 Гц, 1-10-100 кГц.

**Результати.** Відносна діелектрична проникність з високою достовірністю лінійно залежить від питомої густини та ступеня об'ємного заповнення та в незначній мірі змінюється в залежності від частоти вимірювання. Підвищення температури здатне змінювати значення відносної діелектричної проникності тільки у випадку монолітних зразків на 2,5% при температурі 50°C. Значення відносної діелектричної проникності, розраховані за теоретичними моделями, збігаються з вимірними для всіх значень об'ємного заповнення. Застосування програмного заповнення дозволяє ефективно варіювати відносну діелектричну проникність матеріалів.

**Наукова новизна.** Встановлено, що відносна діелектрична проникність дослідних зразків полілактиду має лінійний характер залежності від ступеня об'ємного заповнення.

**Практична значимість.** Встановлено, що використання програмного заповнення дослідних зразків підчас адитивного виробництва дозволяє створювати матеріали з регульованими значеннями відносної діелектричної проникності при створенні виробів радіочастотного призначення.

**Ключові слова:** адитивне виробництво; полімерні матеріали; програмовані структури; відносна діелектрична проникність.

**Вступ.** Полімерні матеріали широко використовуються в електротехнічній галузі промисловості для виготовлення ізоляційних матеріалів для кабелів та проводів, компонентів електронних пристроїв, екранів, конденсаторів та інших елементів. Полімери за своїми електричними властивостями поділяються на діелектрики, напівпровідники та електропровідні матеріали. Поділ між цими класами досить умовний. Для діелектриків характерні значення провідності нижче  $10^{-10}$  См/см. Полімери з вищою питомою електричною провідністю відносяться до класу напівпровідників. Якщо провідність понад 1 См/см, то полімери вважають електропровідними [1].

Для діелектриків характерна дуже низька питома електропровідність, яка збільшується з підвищенням температури. Більшість полімерів належать до діелектриків. Проте їх діелектричні властивості різні і залежать від складу та структури макромолекул, зокрема від кількості полярних груп та їх виду. Так, наприклад, гідроксильні, галогенні, карбоксильні та інші полярні групи погіршують діелектричні властивості полімерів. Тобто, полімери, що не мають полярних замісників є добрими діелектриками. Збільшення молекулярної маси полімерів зумовлює покращення діелектричних властивостей. У випадку переходу від склоподібного до високоеластичного і в'язкотекучого станів відбувається зростання питомої електричної провідності полімерів [2].

Електрична провідність діелектриків сильно залежить від руху іонів, що утворюються при деструкції полімерів, а також наявності домішок, низькомолекулярних продуктів поліконденсації, розчинників, ініціаторів чи каталізаторів полімеризації. Для покращення

діелектричних властивостей доцільно мінімізувати вміст домішок в полімері. Гідроксильні функціональні групи в полімерах зумовлюють їх гідрофільність, тобто здатність поглинати вологу, і як наслідок, підвищення електричної провідності полімерів [3–5].

Адитивне виробництво сучасна технологія перетворення програмних просторових моделей у фізичну форму зокрема з застосуванням полімерів. Адитивне виробництво в сучасності це технологія масового виробництва деталей та конструкцій, що дозволяє виробляти одиничний виріб з високою складністю просторової форми. Важливе застосування адитивних технологій під час виробництва корпусів та деталей електронної техніки, зокрема дорнів та пристроїв зв'язку [6–9].

Відносна діелектрична проникність, кут діелектричних втрат це основні властивості полімерних діелектриків. Сучасні застосування полімерних діелектриків включають застосування їх у складі високочастотних пристроїв. Діелектричні властивості важливі для зменшення витрат енергії для здійснення передачі даних [10–11].

Дослідження діелектричних характеристик матеріалів та структур створених адитивним виробництвом дозволить здійснювати коректне проектування радіочастотних характеристик таких пристроїв, що забезпечить їх правильне функціонування.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження впливу програмованої просторової структури розподілу матеріалів, отриманих методом адитивного виробництва на їх діелектричні властивості.

**Вихідні матеріали та методи.** Для досліджень використано мононитку з полілактиду марки Total Corbion Luminy L175. Для вимірювання діелектричних характеристик використовували зразок циліндричної форми діаметром 150 мм та товщиною 5мм. Зразок виготовляли адитивним виробництвом шляхом пошарового нанесення розплаву полімеру з використанням пристрою для адитивного виробництва алюмейкер конструктивного виконання типу Prusa I3. Просторову модель зразка створювали у графічному ректорі Solid Works. Модуль зразка зберігали в формат .stl та перетворювали у машинний код G-kod з використанням програми Cura 5.0. параметри перетворення моделі у машинний код наведено в табл 1.

Таблиця 1

Параметр перетворення моделі у машинний код

№	Параметр	Значення
1	Діаметр сопла, мм	0,6
2	Ширина екструзії, мм	0,6
3	Висота шару,	0,3
4	Коефіцієнт екструзії	1
5	Ретракт, мм	1
6	Швидкість загальна, мм/хв	40
7	Швидкість для заповнення, мм/хв	40
8	Швидкість для периметрів, мм/хв	30
9	Температура сопла, °С	210
10	Температура стола, °С	60
11	Заповнення, %	0–100
12	Заповнення – тип	Hyroid, Lines, Triangles
13	Периметри, шт	2
14	Нижній шар, шт	0
15	Верхній шар, шт	0
16	Спідниця, шт	4
17	Кількість ліній заповнення, шт	1 та (1-13)

Програмні моделі перетворювались у машинний код з ступенем просторового заповнення від 0 до 100%. Всі інші параметри були незмінними.

Використовували програмні заповнення, гіроїд, лінії та трикутники, що вбудовані в програмне забезпечення Cura 5.0

Машинний код моделей передавався на пристрій для адитивного виробництва на змінному носії та здійснювалось адитивне виробництво дослідних зразків.

Перед адитивним виробництвом мононитка висушувалась при 40 °С протягом 12 год. Платформа побудови 3д принтеру була скляна без застосування адгезивів.

Дослідні зразки після адитивного виробництва піддавали зважуванню на аналітичних вагах та вимірювання товщини за допомогою мікрометра.

Для дослідження діелектричних характеристик використовувався RLC-метр DER EE LCR METER DE-5000. Використовувалась 4-х електродна схема вимірювання з додатковим контактним пристроєм TL-21. Проводилось вимірювання ємності та тангенса кута діелектричних втрат дослідних зразків з застосуванням змінного струму та вимірювальних частот 100 Гц, 1-10-100 кГц.

Вимірювальна комірка виготовлена з металевих дисків діаметром 150 мм з плоскопаралельними шліфованими поверхнями. Зразок відомої товщини, поміщали між пластинами, утворюючи таким чином плоский конденсатор з круглими електродами – вимірювальну комірку, яка поміщалась в термошафу для проведення вимірювань при різних температурах. Температура у шафі змінювалась від 30 до 60°С з кроком 10°С. Перед фіксуванням значення зразок термостатувався 1 год. Схема дослідної установки наведена на рис. 1.

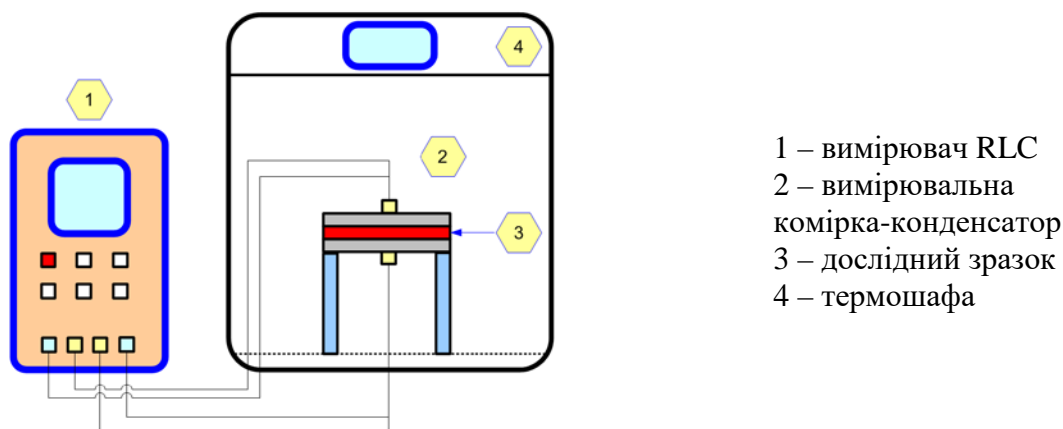


Рис. 1. Установка для вимірювання ємності та діелектричних характеристик

Для розрахунку відносної діелектричної проникності використовували рівняння [12]:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot D^2}, \quad (1)$$

де  $C$  – ємність вимірювального конденсатора,  $\Phi$ ;

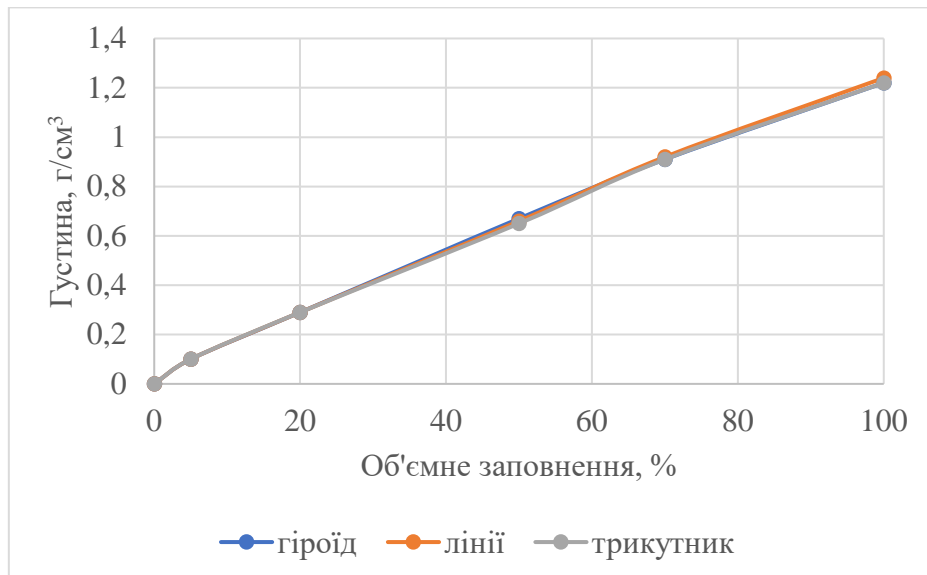
$d$  – відстань між обкладинками вимірювального конденсатора,  $m$ ;

$\varepsilon_0$  – електрична стала,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/m$ ;

$D$  – діаметр конденсатора,  $m$ ;

$\pi$  – відношення довжини кола до його діаметру,  $\pi = 3,14$ .

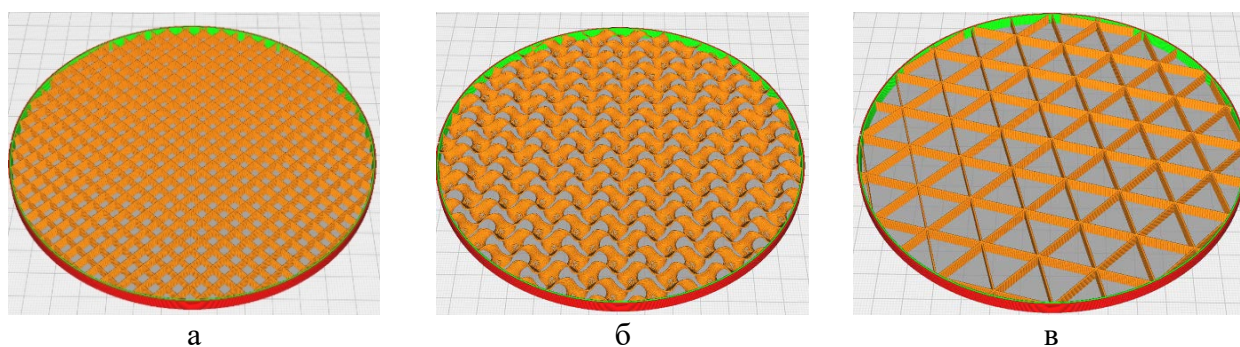
**Результати дослідження.** Програмне заповнення об'єму моделі дозволяє розподілити матеріал у об'ємі та отримати зразки з різною питомою густиною. Використовуючи значення об'єму та ваги дослідного зразка розраховували значення питомої густини в залежності від ступеня програмного заповнення (рис. 2).



**Рис. 2. Залежність густини дослідного зразка від виду та ступеня програмного заповнення**

Залежність ступеня програмного заповнення від питомої густини має лінійний характер та не залежить від виду геометричної структури для всіх видів зразків.

Використано різні геометричні варіанти розподілу матеріалу – гіроїд, лінії та трикутник, що наявні у програмному забезпеченні Cura 5.0. (рис. 3).



**Рис. 3. Зовнішній вигляд програмного заповнення об'єму дослідних зразків згідно алгоритму: а – лінії; б – гіроїд; с – трикутник**

Заповнення лінії та трикутник відносяться до двох мірних структур, а заповнення гіроїд – до тримірних.

Для кожного ступеня заповнення розраховано еквівалентний розмір комірки. Значення розміру просторової комірки, що генерується при перетворенні моделі наведено в табл. 2.

Значення розміру комірки важливе для інтерпретації частотних характеристик зразка при вимірюванні змінним струмом. За допомогою програмного забезпечення була оцінена вага зразка, що моделюється з використанням значення густини матеріалу  $1,24 \text{ г/см}^3$ . В таблиці

3 наведено розраховане та вимірне значення зразків. Відхилення маси може бути пояснене коливаннями діаметру мононітки для 3Д друку та точністю моделювання.

Таблиця 2

**Значення еквівалентного розміру комірок об'ємного заповнення дослідних зразків**

Об'ємне заповнення, %	Еквівалентний розмір комірки, мм		
	Для типу об'ємного заповнення		
	Гіроїд	Лінії	Трикутники
5	12,0	24,0	36,0
10	6,0	12,0	18,0
20	3,0	6,0	9,0
50	1,2	1,2	3,6
70	0,8	0,8	2,6
100	0,6	0,6	1,8

Таблиця 3

**Розраховані та вимірні значення ваги дослідних зразків**

Об'ємне заповнення, %	Розрахункова/вимірне значення ваги зразка, г		
	Гіроїд	Лінії	Трикутники
5	9/9,2	9/9,2	9/9,2
10	15/14,7	14/14,2	14/14,3
20	26/25,7	25/26,1	25/26,6
50	58/57,2	58/60,0	58/60,0
70	80/78,7	79/78,3	79/78,1
100	111/107,7	112/111,6	112/114,3

З наведених результатів прослідковується узгодженість розрахованих та вимірних значень ваги зразків при застосуванні вимірного значення густини матеріалу, дані моделювання, що генеруються програмним забезпеченням можуть бути успішно використані у практичних застосуваннях.

На рис. 4 наведено залежність вимірного значення ємності від питомої густини для різних вимірювальних частот при температурі 25°C.

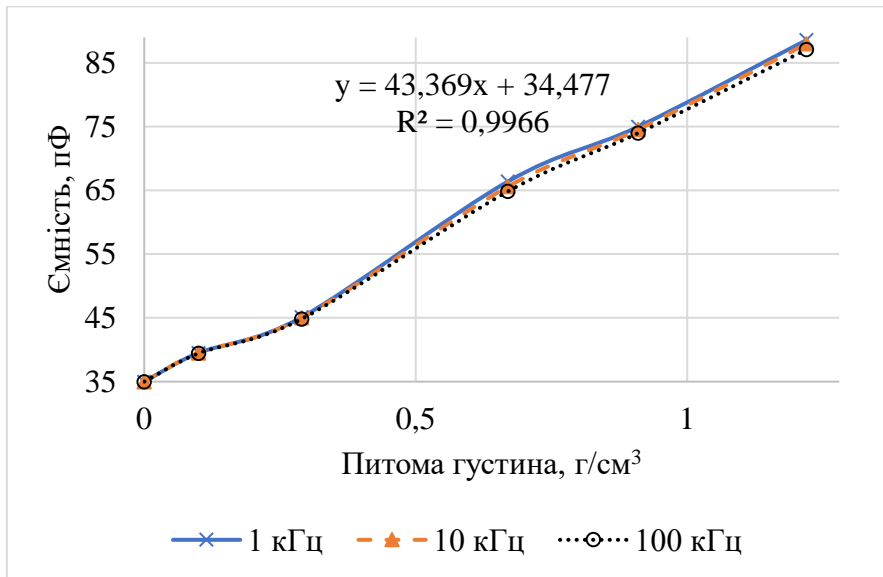
Отримані залежності мають лінійний характер, величина достовірності апроксимації 0,99. Значення ємності змінюються з частотою вимірювальної напруги та мають лінійний характер залежності від питомої густини.

Значення тангенса кута діелектричних втрат вимірне приладом, змінюється від 0,005 до 0,001 для всіх видів зразків та частот вимірювання. Для заповнення від 5 до 20 % значення становить 0,001 а для монолітного заповнення 0,005.

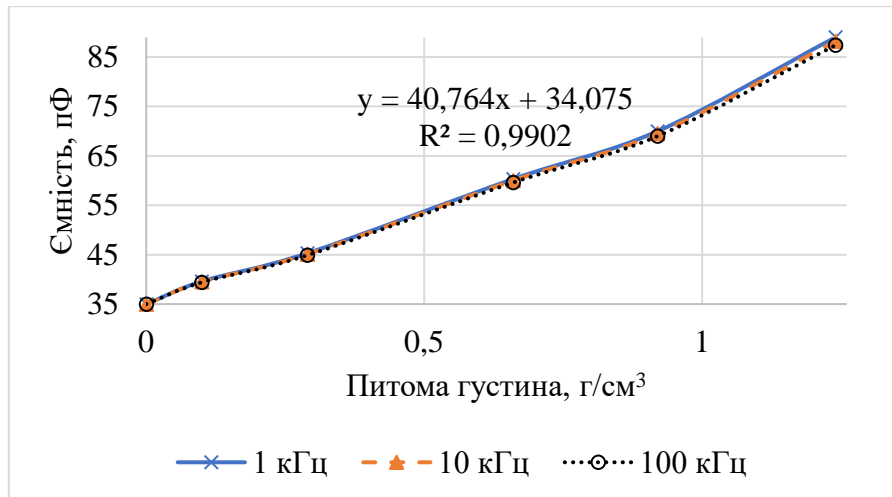
На основі даних ємності та геометричних розмірів вимірювальної комірки здійснено розрахунок відносної діелектричної проникності ( $\epsilon$ ) зразка. Значення  $\epsilon$  для монолітних зразків збігаються з літературними даними з інженерною точністю. Слід зазначити, що технологія адитивного виробництва не завжди забезпечує монолітну структуру зразка, так як об'єм заповнюється циліндричними потоками матеріалу. Значення питомої густини монолітного зразка дещо відмінне від вимірного значення густини монолітного зразка полімеру.

На рис. 5 наведено залежність розрахованого значення відносної діелектричної проникності від питомої густини для різних вимірювальних частот при температурі 25°C.

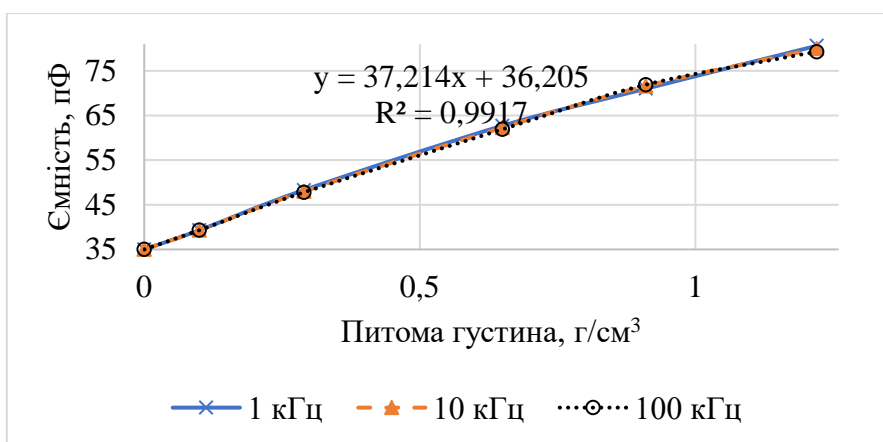
Отримані залежності мають лінійний характер з величиною достовірності апроксимації 0,99, відносна діелектрична проникність лінійно зменшується зі зниженням питомої густини.



а

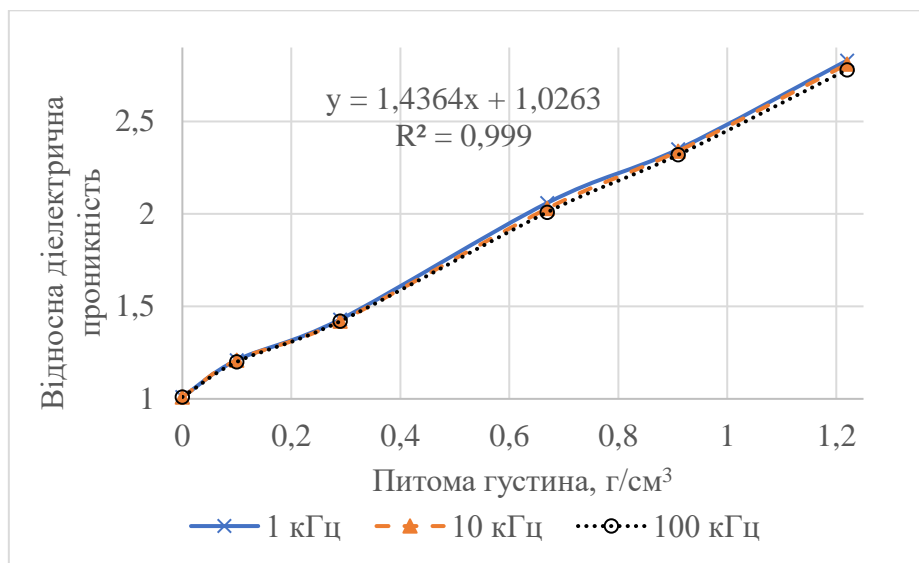


б

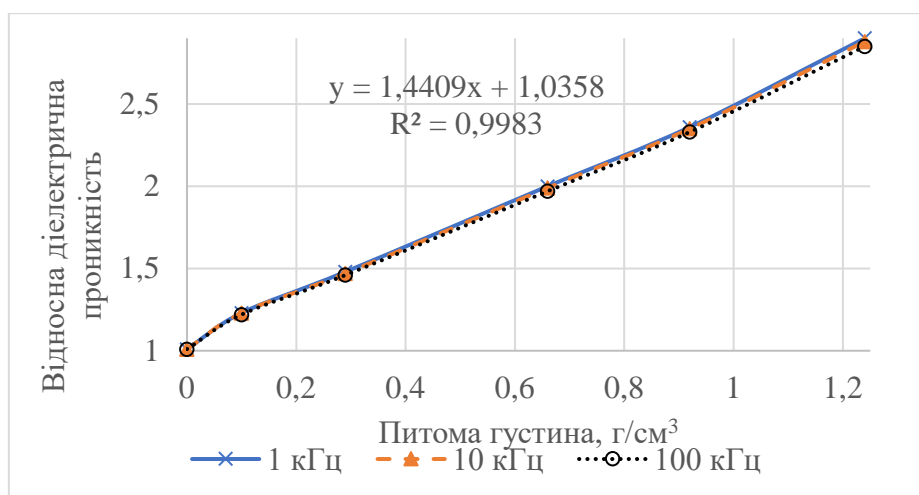


в

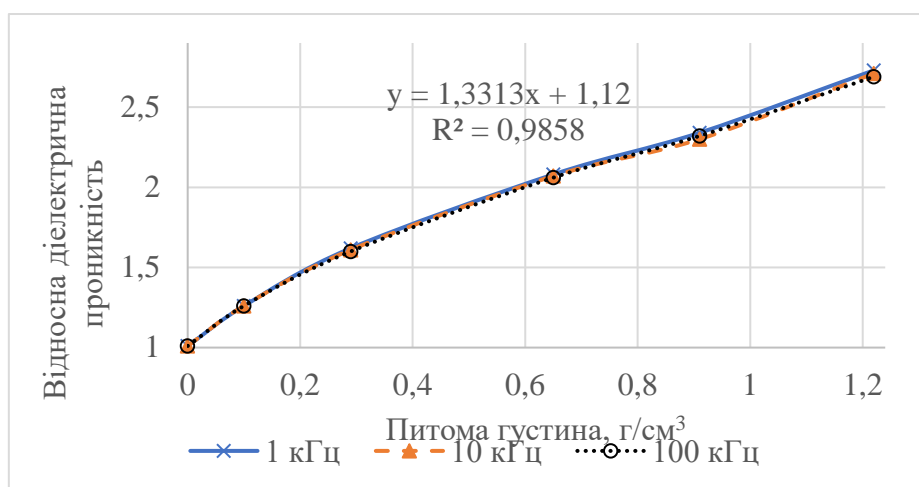
Рис. 4. Залежність ємності зразка від питомої густини для різних частот при типі об'ємного заповнення: а – гірїд; б – лїнії; в – трикутники



а



б



в

Рис. 5. Залежність відносної діелектричної проникності від питомої густини при різних частотах вимірювання для типів об'ємного заповнення:  
а – гіроїд; б – лінії; в – трикутники

З літературних джерел відомо, що існують теоретичні моделі, котрі дозволяють розрахувати значення відносної діелектричної проникності розподілу матеріалів у об'ємі [13]. Найбільш вживаною є модель Вінера для теорії ефективного середовища, яка на сьогоднішній день є найпоширенішою моделлю для прогнозування відносної діелектричної проникності двокomпонентних композитів, що описується залежністю:

$$\varepsilon_{max} = f \cdot \varepsilon_m + (1-f) \cdot \varepsilon_f, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{max}$  – відносна діелектрична проникність для суміші;  
 $f$  – об'ємний вміст компонента суміші;  
 $\varepsilon_m$  – відносна діелектрична проникність полімерної матриці;  
 $\varepsilon_f$  – відносна діелектрична проникність наповнювача.

На рис. 6 наведено розраховані за рівнянням (2) (лінії 1–3) та розраховані за вимірними значеннями ємності (лінії 4–6) значення відносної діелектричної проникності зразків з різними типами об'ємного заповнення.

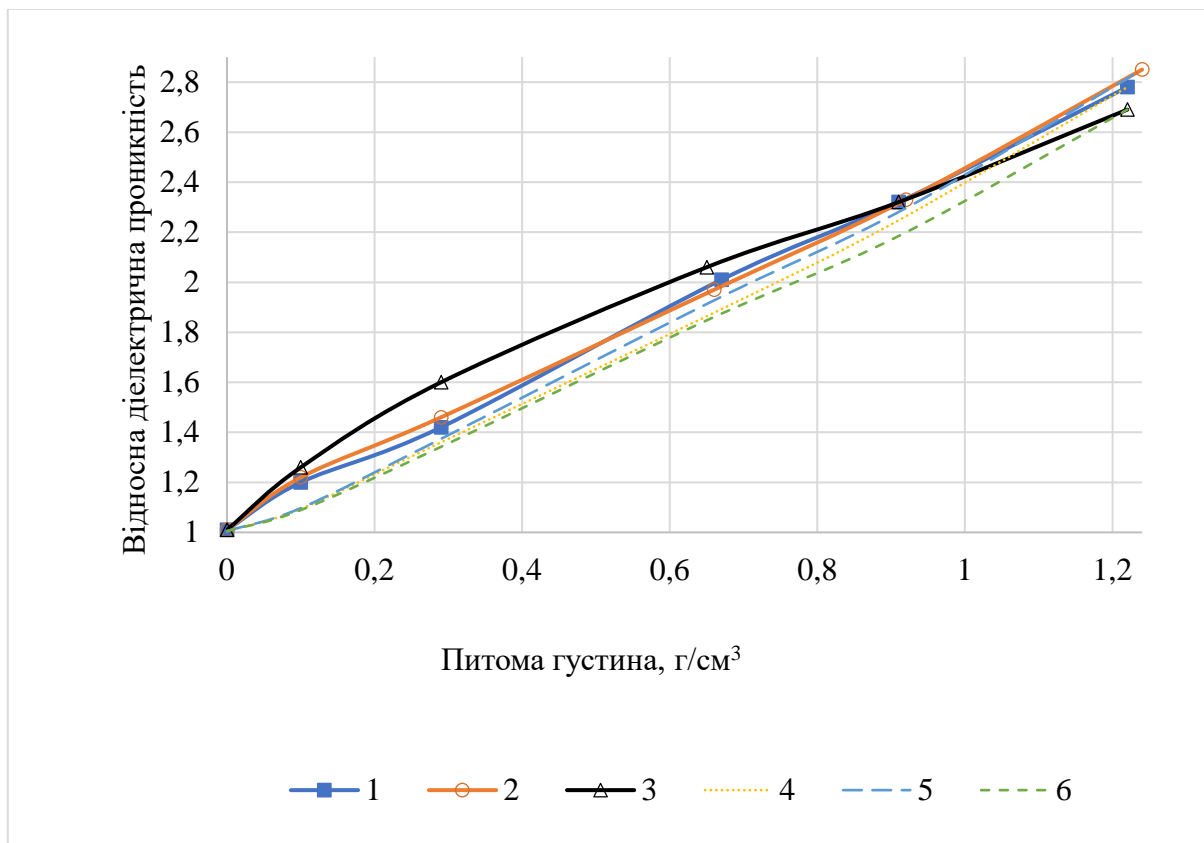


Рис. 6. Залежність відносної діелектричної проникності від питомої густини для різних типів об'ємного заповнення при частоті 100кГц: 1- гіроїд; 2 – лінії; 3 – трикутники; 4 – гіроїд; 5 – лінії; 6 – трикутники

Розраховані на основі вимірювань та за математичною моделлю значення відносної діелектричної проникності добре узгоджуються для всіх досліджених типів об'ємного заповнення.

Результати вимірювання відносної діелектричної проникності при підвищеній температурі наведено на рис. 7.



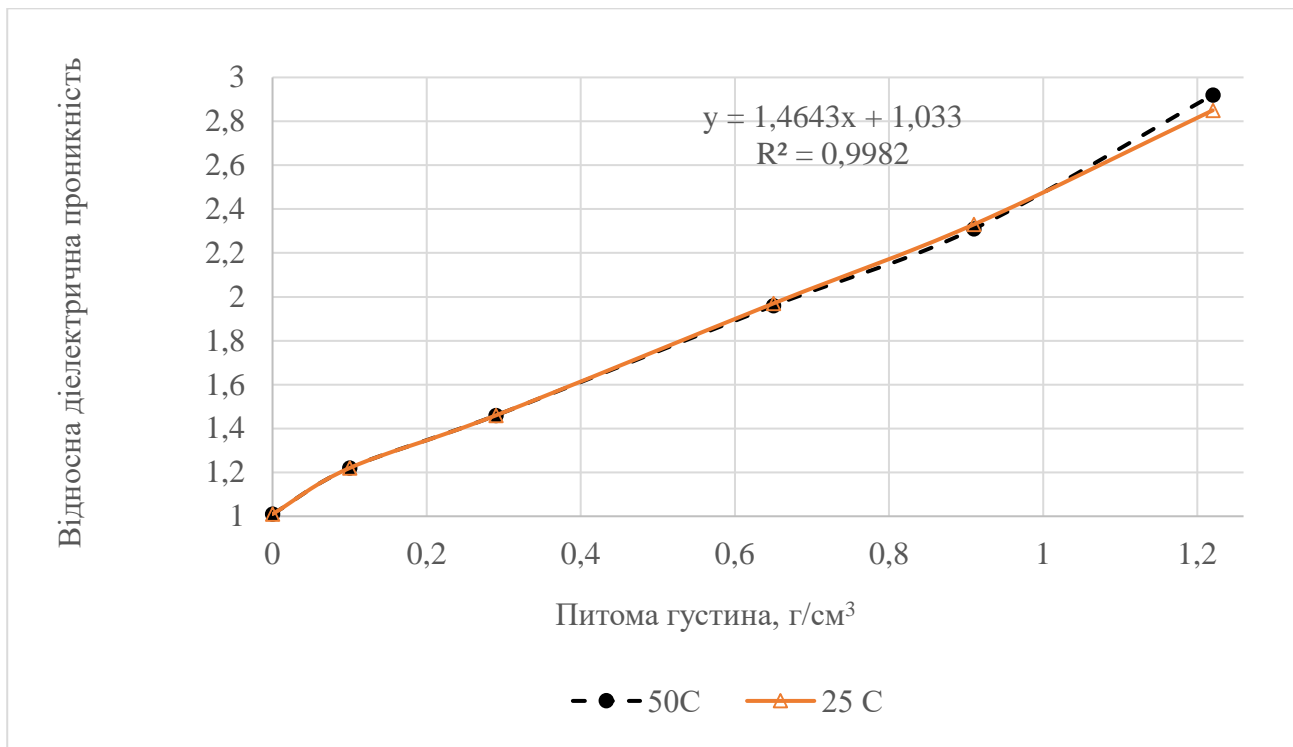


Рис. 7. Залежність відносної діелектричної проникності від питомої густини для зразка з типом об'ємного заповнення – лінії при різних температурах та частоті 100кГц

Для дослідних зразків з типом об'ємного заповнення – лінії спостерігається незначна зміна відносної діелектричної проникності з температурою. Для монолітних зразків спостерігається зростання відносної діелектричної проникності з 2,85 при 25°C до 2,95 при 50°C, що свідчить про не суттєвий вплив температури діапазону типової експлуатації виробів.

**Висновки.** Для виробів, створених адитивним виробництвом, питома густина лінійно залежить від об'ємного заповнення. Варіюючи об'ємне заповнення та його тип можливо регулювати густину виробу і створювати таким чином структури, що подібні до пін з програмованою структурою.

Відносна діелектрична проникність з високою достовірністю лінійно залежить від питомої густини та ступеня об'ємного заповнення. Варіювання питомої густини дозволяє з високою точністю та відтворюваністю змінювати відносну діелектричну проникність виробів.

Відносна діелектрична проникність не значною мірою залежить від частоти вимірювання ємності в діапазоні 1–100 кГц.

Вплив температури зразка в діапазоні 25–50°C спостерігається лише для монолітно заповнених зразків полілактиду, у вигляді зростання значення відносної діелектричної проникності на 2,5% при температурі 50°C.

Значення відносної діелектричної проникності, розраховані за теоретичними моделями, збігаються з вимірними для всіх значень об'ємного заповнення.

Показано, що застосування програмного заповнення дозволяє ефективно варіювати відносну діелектричну проникність матеріалів.

Одержані дані можуть бути використані при проектуванні полімерних виробів, котрі застосовуються у радіочастотних та електронних застосуваннях.

## References

1. Haque, S. M., Ardila-Rey, J. A., Umar, Y., Mas' ud, A. A., Muhammad-Sukki, F., Jume, B. H., ... & Bani, N. A. (2021). Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. *Energies*, 14(10), 2758.
2. Kovalchuk, O. V., Kovalchuk, T. M., Harbovskiy, Yu. A., Lahoda, O. A., Svistilnik, R. F., Pushkarov, D. V., Volokh, L. V., Oleinykova, I. V. (2023). Temperature dependence of the dielectric properties of a nanocomposite material based on linear polyethylene at the beginning of the percolation transition. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics (SPQEO)*, 2023, №1.
3. Hummel, R. E. (2001). Conducting Polymers and Organic Metals. *Electrical Properties of Polymers, Ceramics, Dielectrics, and Amorphous Materials* (pp. 166–193). Springer Berlin Heidelberg. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-86538-1\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-86538-1_9).
4. Surjadi, J. U., Gao, L., Du, H., Li, X., Xiong, X., Fang, N. X., Lu, Y. (2019). Mechanical metamaterials and their engineering applications. *Advanced Engineering Materials*, 21(3), 1800864.
5. Xie, P., Shi, Z., Feng, M., Sun, K., Liu, Y., Yan, K., ... & Guo, Z. (2022). Recent advances in radio-frequency negative dielectric metamaterials by designing heterogeneous composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5(2), 679–695.
6. Iskandarov, R. Sh., Sova, N. V., Savchenko, B. M., Piatnychuk, I. I., Tataranenko, V. A. (2019). Additive formation of carbon composites based on L-poly lactide [Адитивне формування вуглекомпозитів на основі L-полілактоїду]. *Visnyk KNUTD. Seriya Tekhnichni nauky = Bulletin of KNUTD. Series Technical sciences*, 6, 104–111. <http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.10> [in Ukrainian].
7. Sova, N. V., Sleptsov, O. O., Fedoriv, T. R., Martynenko, A. O., Kudlai, M. R., Iskandarov, R. Sh. (2020). Vplyv parametriv adytyvnoho formuvannia na elektrychni vlastyvoli hrafitonapovnenoho kompozytu na osnovi polilaktydu [Influence of additive molding parameters on electrical properties of graphite-filled polylactide-based composite]. *Visnyk KNUTD. Seriya Tekhnichni nauky = Bulletin of KNUTD. Series Technical sciences*, 5, 93–102. <http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2020.5.9> [in Ukrainian].
8. Yang, D., Mei, H., Yao, L., Yang, W., Yao, Y., Cheng, L., ... & Dassios, K. G. (2021). 3D/4D printed tunable

## Література

1. Haque S. M., Ardila-Rey J. A., Umar Y., Mas' ud A. A., Muhammad-Sukki F., Jume B. H. ... & Bani N. A. Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. *Energies*. 2021. 14(10). 2758.
2. Kovalchuk O. V., Kovalchuk T. M., Harbovskiy Yu. A., Lahoda O. A., Svistilnik R. F., Pushkarov D. V., Volokh L. V., Oleinykova I. V. Temperature dependence of the dielectric properties of a nanocomposite material based on linear polyethylene at the beginning of the percolation transition. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics (SPQEO)*. 2023. №1.
3. Hummel R. E. Conducting Polymers and Organic Metals. *Electrical Properties of Polymers, Ceramics, Dielectrics, and Amorphous Materials* (pp. 166–193). Springer Berlin Heidelberg, 2001. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-86538-1\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-86538-1_9).
4. Surjadi J. U., Gao L., Du H., Li X., Xiong X., Fang N. X., Lu Y. Mechanical metamaterials and their engineering applications. *Advanced Engineering Materials*. 2019. 21(3). 1800864.
5. Xie P., Shi Z., Feng M., Sun K., Liu Y., Yan K., ... Guo Z. Recent advances in radio-frequency negative dielectric metamaterials by designing heterogeneous composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022. 5(2). P. 679–695.
6. Іскандаров Р. Ш., Сова Н. В., Савченко Б. М., П'ятничук І. І., Татараненко В. А. Адитивне формування вуглекомпозитів на основі L-полілактоїду. *Вісник КНУТД. Серія Технічні науки*. 2019. № 6. С. 104–111. <http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.10>.
7. Сова Н. В., Слепцов О. О., Федорів Т. Р., Мартиненко А. О., Кудлай М. Р., Іскандаров Р. Ш. Вплив параметрів адитивного формування на електричні властивості графітонаповненого композиту на основі полілактоїду. *Вісник КНУТД. Серія Технічні науки*. 2020. № 5. С. 93–102. <http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2020.5.9>.
8. Yang D., Mei H., Yao L., Yang W., Yao Y., Cheng L., ... Dassios K. G. 3D/4D printed tunable electrical metamaterials with more

- electrical metamaterials with more sophisticated structures. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(36), 12010–12036.
9. de Oliveira Neto, A. M., Justo, J. F., Beccaro, W., & de Oliveira, A. M. (2023). Designing and building radio frequency devices with tailored dielectric properties using additive manufacturing. *Microwave and Optical Technology Letters*, 65(3), 777–784.
10. Qiao, Y., Yin, X., Zhu, T., Li, H., Tang, C. (2018). Dielectric polymers with novel chemistry, compositions and architectures. *Progress in Polymer Science*, 80, 153–162.
11. Yang, Z., Yue, D., Yao, Y., Li, J., Chi, Q., Chen, Q., ... & Feng, Y. (2022). Energy storage application of all-organic polymer dielectrics: a review. *Polymers*, 14(6), 1160.
12. Kucheruk, I. M., Horbachuk, I. T., Lutsyk, P. P. (2001). *Zahalnyi kurs fizyky u 3 t.: navch. posib.* [General course of physics in 3 volumes: education. manual]. Kyiv: Tekhnika. Vol. 2. Elektryka i mahnetyzm [Electricity and magnetism]. P. 60–64 [in Ukrainian].
13. Goulas, A., Zhang, S., McGhee, J. R., Cadman, D. A., Whittow, W. G., Vardaxoglou, J. C., Engstrøm, D. S. (2020). Fused filament fabrication of functionally graded polymer composites with variable relative permittivity for microwave devices. *Materials & Design*, 193, 108871.
- sophisticated structures. *Journal of Materials Chemistry C*. 2021. 9(36). P. 12010–12036.
9. de Oliveira Neto A. M., Justo J. F., Beccaro W., de Oliveira A. M. Designing and building radio frequency devices with tailored dielectric properties using additive manufacturing. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2023. 65(3). P. 777–784.
10. Qiao Y., Yin X., Zhu T., Li H., Tang C. Dielectric polymers with novel chemistry, compositions and architectures. *Progress in Polymer Science*. 2018. 80. P. 153–162.
11. Yang Z., Yue D., Yao Y., Li J., Chi Q., Chen Q., ... Feng Y. Energy storage application of all-organic polymer dielectrics: a review. *Polymers*. 2022. 14(6). 1160.
12. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики у 3 т.: навч. посіб. К.: Техніка, 2001 Т. 2. Електрика і магнетизм. С. 60–64.
13. Goulas A., Zhang S., McGhee J. R., Cadman D. A., Whittow W. G., Vardaxoglou J. C., Engstrøm D. S. Fused filament fabrication of functionally graded polymer composites with variable relative permittivity for microwave devices. *Materials & Design*. 2020. 193. 108871.

**SAVCHENKO BOHDAN**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Chemical Technologies and Resource  
Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8636-5734>  
Scopus Author ID: 57212779258  
E-mail: [1079@ukr.net](mailto:1079@ukr.net)

**KHOMENKO VOLODYMYR**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Chemical Technologies and Resource  
Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>  
Scopus Author ID: 7004402598  
E-mail: [v.khomenko@i.ua](mailto:v.khomenko@i.ua)

**BULHAKOV YEVHENII**

Postgraduate Student, Department of Chemical  
Technologies and Resource Saving of the Kyiv National  
University of Technologies and Design, Ukraine  
E-mail: [Yevhenii.bulhakov97@gmail.com](mailto:Yevhenii.bulhakov97@gmail.com)

**SOVA NADIYA**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Chemical Technologies and Resource  
Saving, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3550-6135>  
Scopus Author ID: 56685569600  
E-mail: [djanc@ukr.net](mailto:djanc@ukr.net)

**SLIEPTSOV OLEKSANDR**

PhD, Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University of  
Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0608-1855>  
Scopus Author ID: 57189215952

**SLEPCHENKO ROMAN**

Student, Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University of  
Technologies and Design, Ukraine

SAVCHENKO B. M., SOVA N. V., KHOMENKO V. G., SLIEPTSOV O. O.,  
BULHAKOV Ye. S., SLEPCHENKO R. Yu.

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

**APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE CREATION  
OF METAMATERIALS WITH ADJUSTABLE DIELECTRIC PROPERTIES**

**Purpose.** *The purpose of this article is to study the influence of the programmable infill structure of material obtained by the additive manufacturing method on their dielectric properties.*

**Methodology.** *The dielectric characteristics of the test samples were studied by measuring their capacitance and dielectric loss tangent using the RLC meter according to a 4-electrode scheme. The measurements were carried out using alternating current and measuring frequencies of 100 Hz, 1-10-100 kHz.*

**Findings.** *The relative permittivity is linearly dependent on the specific density and degree of volume filling with high reliability and varies slightly with the measurement frequency. An increase in temperature can change the value of the relative permittivity only in the case of monolithic samples by 2.5% at a temperature of 50°C. The values of the relative permittivity calculated by theoretical models coincide with the measured values for all values of the volume filling. The use of software filling makes it possible to effectively vary the relative permittivity of polylactide material.*

**Originality.** *It was found that the relative dielectric constant of the polylactide samples under study has a linear dependence on the degree of volume filling.*

**Practical value.** *It has been established that the use of software filling of prototypes during additive manufacturing allows the creation of materials with adjustable values of the relative permittivity for the creation of products for radio frequency applications.*

**Keywords:** *additive manufacturing; polymeric materials; programmable structures; relative permittivity.*