

[0000-0002-1684-342X] **В. С. Титаренко,**  
e-mail: titarenko9494@gmail.com  
[0000-0003-1741-9329] **Д. В. Тичков**

Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

*У статті розроблено та досліджено імітаційну модель (на базі математичного процесора MatLab Simulink) інформаційно-вимірювальної системи електричних характеристик (залишкового поверхневого електричного заряду, ємності поверхневого шару тощо) функціональних покриттів електронних пристроїв. Основною метою цієї імітаційної моделі було визначення раціональних параметрів вимірювання розробленої авторами інформаційно-вимірювальної системи та керування нею, які б спростили процес налагодження такої системи, а також дослідження динамічних режимів її роботи. Основною перевагою розробленої імітаційної моделі є можливість проведення інтерактивного дослідження роботи інформаційно-вимірювальної системи в різних, зокрема граничних, режимах. Випробування імітаційної моделі інформаційно-вимірювальної системи дозволили дослідити її роботу за різних умов і режимів вимірювального експерименту, а також віртуально визначити раціональні параметри роботи такої вимірювально-керуючої системи. Встановлено задовільну розбіжність експериментальних результатів 8-11,5 % порівняно з даними, отриманими аналітичним шляхом, що підтверджує правильність і адекватність складеної моделі.*

**Ключові слова:** електронний пристрій, функціональне покриття, інформаційно-вимірювальна система, електрична характеристика, імітаційна модель.

**Вступ.** Функціональні покриття (сенсорні, модулюючі, візуалізуючі та інші) сучасних електронних пристроїв знайшли широке застосування в багатьох галузях людської діяльності і на сьогодні мають широке впровадження та подальший розвиток [1-3]. Однак подальша мініатюризація цих пристроїв, підвищення їх функціональності та надійності зумовлюють необхідність більш компактного розміщення мікрокомпонентів таких пристроїв у їх робочих об'ємах. Це, в свою чергу, призводить до появи різноманітних електричних (так, паралельні провідники створюють шкідливу ємність, тоді як будь-який замкнений ланцюг зі струмом утворює індукційний елемент на поверхні пристрою) та механічних (трибологічних, динамічних) перешкод у таких приладах [4]. Такі перешкоди слід враховувати на етапі їх проектування. Проте у більшості випадків такі ефекти проявляються на етапах дослідно-промислових випробувань або взагалі експлуатації виробів.

Основними електричними характеристиками, які мають істотний вплив на характе-

ристики функціональних покриттів, є поверхневий електричний заряд та електрична ємність поверхневого шару.

Для швидкого й ефективного визначення електричного заряду та залишкової електроємності в поверхневому шарі діелектрика, який є основою більшості електронних мікропристроїв, у роботі пропонується розробити та використовувати інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) електричних характеристик функціональних покриттів електронних пристроїв. Створенню такої ІВС передують її моделювання з метою встановлення робочих параметрів та режимів визначення електричних характеристик і усунення суб'єктивних похибок, які можуть виникнути на етапі проектування ІВС.

Розробкою подібних імітаційних моделей (проте в більшості випадків для визначення поверхневого та об'ємного електричного заряду в діелектриках) займається ряд учених, а саме: П. А. Тарагаєв, С. Є. Кузнецов, Е. Сабат, А. Куффель та ін. [5-8]. Проте в роботах цих учених недостатньо показані ре-

зультати дослідження залишкових електричних зарядів, що виникають на поверхнях діелектричних матеріалів під виробами мікроелектроніки та мікросхемотехніки (кремній, скло, ситал та ін.).

Тому розробка імітаційної моделі електричних характеристик ІВС функціональних покриттів мікроелектромеханічних пристроїв, яка спрощує процес налаштування такої ІВС та дослідження динамічних режимів її роботи, є питанням, яке досі не вирішене.

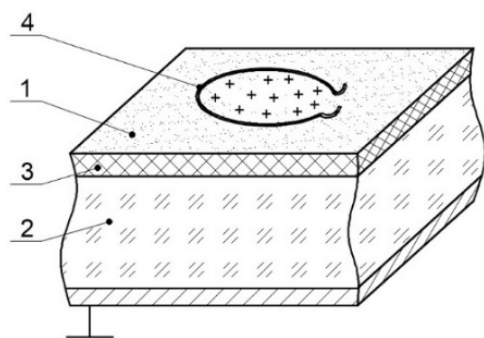
**Метою роботи** є розробка імітаційної моделі ІВС електричних характеристик (залишковий електричний заряд, електроємність поверхневого шару тощо), яка розроблена на базі математичного процесора Matlab Simulink і дозволяє проводити інтерактивні дослідження функціональних покриттів електронних пристроїв цією ІВС у різних (включаючи граничні та критичні) режимах.

Основними задачами для досягнення поставленої мети є:

- розробити схему вимірювання поверхневого електричного заряду та запропонувати імітаційну модель ІВС електричних характеристик функціональних покриттів;

- дослідити зміну енергетичного розподілу електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів з різною електропровідністю, а також зміну у величині такого заряду за час проведення дослідження.

**Математичний опис інформаційно-вимірювальної системи.** Вимірювання електричного заряду поверхні проводять за схемою, зображеною на рисунку 1.



**Рисунок 1. Схема вимірювання електричного заряду поверхні:**

- 1 – функціональне покриття (діелектрик);
- 2 – діелектрична основа;
- 3 – електрод; 4 – детектор електричного заряду

Такий поверхневий заряд у діелектрику під кільцем детектора описується ємністю  $C_e$ . Ємність  $C_b$ , з'єднана послідовно з ємністю  $C_e$ , характеризується діелектричною областю, обмеженою кільцем детектора.  $C_a$  – ємність, що характеризується частиною діелектрика, яка знаходиться поза дією детектора електричного заряду. Основні рівняння для розрахунку цих потужностей такі [9]:

$$C_a = \frac{\varepsilon_{rd} \cdot \varepsilon_0 \cdot (S - S_q)}{d}, \quad (1)$$

$$C_b = \frac{(\varepsilon_{rd} - \varepsilon_{ra}) \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2)$$

$$C_e = \frac{\varepsilon_{ra} \cdot \varepsilon_0 \cdot S_q}{d_n}, \quad (3)$$

де  $S$  – площа поверхні діелектричного зразка, обмеженого кільцем детектора;  $S_q$  – площа поверхні діелектрика під кільцем детектора електричного заряду;  $d$ ,  $d_n$  – відповідно, повна товщина та товщина поверхневого шару діелектрика;  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність ( $\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\varepsilon_{ra}$  – діелектрична проникність повітря ( $\varepsilon_{ra} = 1$ );  $\varepsilon_{rd}$  – діелектрична проникність діелектрика (наприклад, для скла  $\varepsilon_{rd} = 2,4$ ).

Максимально допустима напруга  $U_c$  і сумарний заряд  $q$ , виміряний на поверхні діелектрика, визначаються за такими формулами [10]:

$$U_c = \frac{U_a \cdot C_b}{(C_a + C_b)}, \quad (4)$$

$$q = C_e \cdot U_c, \quad (5)$$

де  $U_a$  – критична напруга пробою діелектрика (для скла товщиною 1 мм  $U_a = 5$  кВ).

Порядок розрахунку вимірюваних параметрів наступний. За формулами (1) – (3) розраховується ємність кожної ділянки діелектрика. Далі, за формулами (4) і (5) визначаються значення напруги під детектором на діелектрику та заряду, що утворюється на ньому. Результати, отримані за умов критичних напруг за різних площ поверхні  $S_q$  (для діелектриків з параметрами:  $S = 0,05\pi$ ;  $0,5\pi$ ;  $\pi$  мм<sup>2</sup>;  $d = 1,2$  мм;  $d_n = 0,1$  мм) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри вимірювальної схеми ІВС для критичної напруги пробою (при  $U_a = 5$  кВ)

| Номер зразка | Площа поверхні зразка, обмежена кільцем детектора $S$ , мм <sup>2</sup> | Ємність $C_a$ , Ф     | Ємність $C_b$ , Ф     | Ємність $C_e$ , Ф    | Допустима напруга $U_c$ , В | Загальний заряд, $q$ , Кл |
|--------------|---|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1            | $0,05\pi \approx 0,157$   | $2,5 \cdot 10^{-15}$  | $3,9 \cdot 10^{-15}$  | $1,2 \cdot 10^{-15}$ | 3043,6                      | $3,8 \cdot 10^{-12}$      |
| 2            | $0,5\pi \approx 1,57$   | $26,9 \cdot 10^{-15}$ | $39,1 \cdot 10^{-15}$ | $3,9 \cdot 10^{-15}$ | 2965,7                      | $11,6 \cdot 10^{-12}$     |
| 3            | $\pi \approx 3,14$  | $54,2 \cdot 10^{-15}$ | $78,3 \cdot 10^{-15}$ | $5,5 \cdot 10^{-15}$ | 2955,5                      | $16,3 \cdot 10^{-12}$     |

**Розробка та дослідження імітаційної моделі.** На основі отриманих значень ємності (таблиця 1), що характеризує поверхневий шар на діелектричному матеріалі, проведено моделювання розподілу генерованого електричного заряду.

Імітаційна модель запропонована з метою визначення раціональних параметрів вимірювання та контролю, а розроблена авторами на її основі інформаційно-вимірювальна

система дозволить спростити процес налагодження такої системи, а також дослідити динамічні режими її роботи. Для моделювання використовувався сучасний імітаційний засіб «MATLab Simulink», що дає змогу суттєво спростити аналіз сучасних ІВС із різними алгоритмами їх роботи [11].

Імітаційну модель ІВС, створену в середовищі MATLAB Simulink, зображено на рисунку 2.

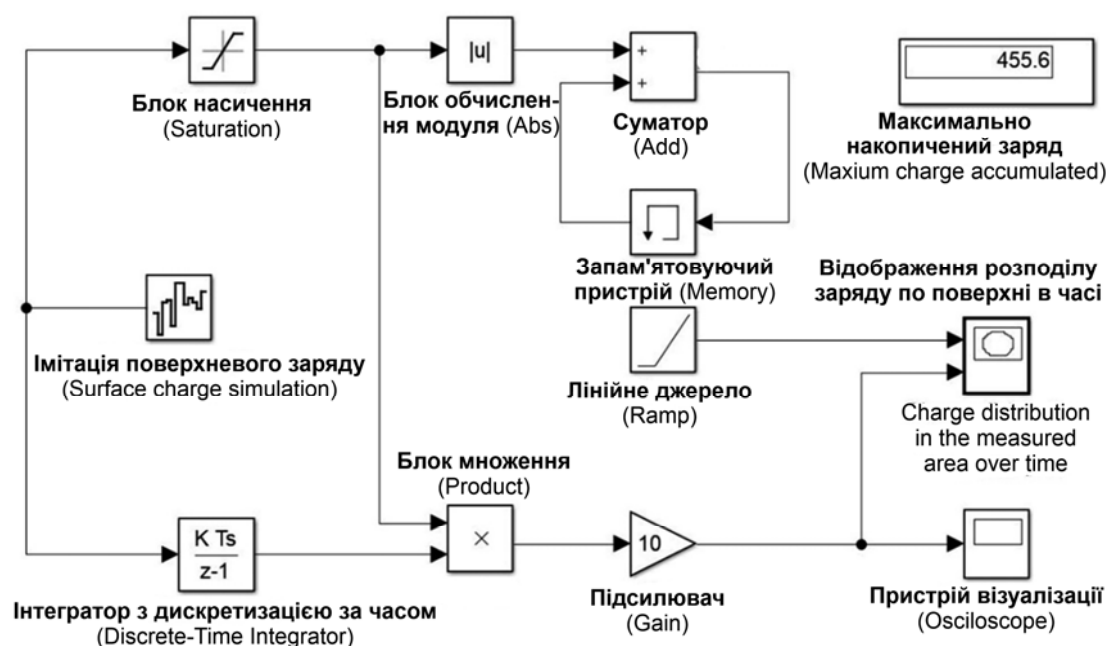


Рисунок 2. Імітаційна модель ІВС електричних характеристик функціональних покриттів. MatLab Simulink

Розроблена імітаційна модель являє собою набір блоків, що моделюють роботу ІВС електричних характеристик функціональних покриттів. Ця модель містить такі блоки: блок моделювання поверхневого заряду, який змінюється за стохастичним законом кожні 0,05 с, і основною метою якого є моделювання поверхневого заряду, що виникає на

поверхні діелектрика та підлягає вимірюванню; інтегратор з дискретизацією за часом, який моделює зміну та розподіл електричного заряду по поверхні в часі; блок насичення, що дозволяє визначити граничну накопичувальну ємність вимірювального датчика; блоки виконання математичних операцій (Abs, Product, Add), призначені для реалізації більш простих

математичних операцій для обчислення вимірюваного електричного заряду та його розподілу; блок пам'яті (Memory), який накопичує і зберігає дані про вимірюваний заряд; підсилювач (Gain), що підвищує вимірюване значення заряду до рівня, достатнього для відображення його на інформаційних пристроях; лінійне джерело (Ramp) – джерело сигналу, призначене для формування на інформаційних пристроях правильної картини розподілу електричного заряду в часі; інформаційні пристрої (осцилограф та інші), призначені для інформаційного відображення інформації про максимальний заряд, накопичений на вимірювальній ділянці, його амплітудно-частотні характеристики, а також розподіл по вимірювальній ділянці за часом [12].

Принцип роботи такої ІВС можна пояснити на прикладі розробленої імітаційної моделі і полягає він у наступному.

На початковому етапі, коли на вимірювальному датчику немає залишкового поверхневого заряду, на входи блоків Abs і Product не подається сигнал, відповідно вся електрична схема приладу знаходиться на «паузі» – має нульовий вихідний рівень.

При підведенні вимірювального датчика на достатню відстань до діелектричної поверхні вимірюваної ділянки (визначається величиною поверхневого заряду, поглиненого датчиком, необхідного для забезпечення мінімального рівня струму в блоці насичення) на дисплеї з'являється мінімальний рівень сигналу. Далі, у відповідних блоках, що здійснюють математичні операції (Abs, Product), сигнал посилюється і передається на блок Saturation, призначений для захисту розробленої ІВС від накопичення занадто високого електричного заряду, який може призвести до електричного пробоя і, як наслідок, до виходу з ладу всієї ІВС. Значення параметрів цього блока не можна змінити. З другого боку, слід пам'ятати, що мінімальне значення вихідного параметра є межею чутливості ІВС.

Після проходження блока Saturation сигнал виводиться на суматор Add, який підключається паралельно до накопичувального пристрою Memory.

Паралельно зв'язку, що веде до суматора, вихідний сигнал подається в блок Product,

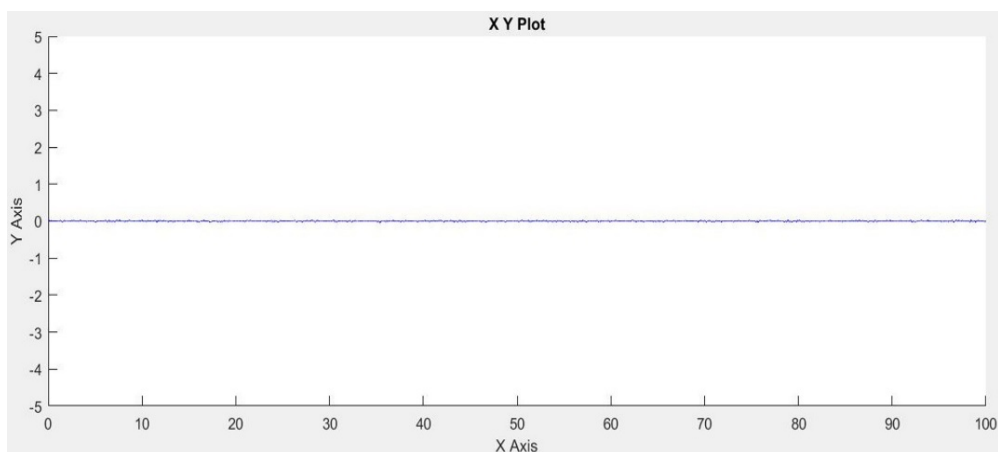
де він множиться на сигнал, отриманий від блока інтегратора дискретного часу. Основною метою блока Product є якомога точніша апроксимація імітаційної моделі розподілу електричного заряду на вибраній ділянці досліджуваної поверхні шляхом масштабування стохастичного електричного заряду, створеного в симуляції поверхневого заряду в часовому діапазоні, заданому дискретним інтегратором часу. Після подальшого посилення в блоці Gain сигнал заряду одночасно надходить на пристрій візуалізації, що показує амплітудно-частотні характеристики прийнятого сигналу в часі (які відповідають розподілу заряду у вимірюваній області в часі).

Особливістю цієї моделі є те, що блок візуалізації (осцилограф) дозволяє отримати розподіл електричного сигналу по площі досліджуваної поверхні за амплітудно-частотними характеристиками в часі.

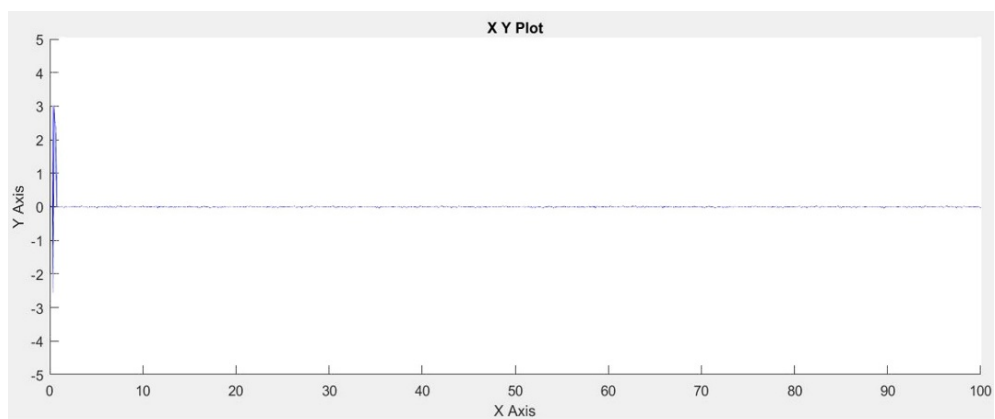
Щоб отримати розподіл енергії електричного сигналу, до посиленого сигналу додається постійний сигнал від лінійного джерела (блок Ramp), що надсилається до блока розподілу заряду у вимірюваній області за час, що дозволяє провести розподіл вихідного сигналу та передати його в блок візуалізації як незатухаючий сигнал, який не зменшується з часом через витрати електроенергії та енергії на елементи ІВС. Це мінімізує потік сигналу в ланцюзі вимірювальної системи та забезпечує приблизне наближення змодельованого розподілу електричного заряду до його справжнього розподілу по поверхні.

Слід зауважити, що встановлення коефіцієнтів (особливо в блоках інтегратора Saturation, Gain і Discrete-time integrator) слід проводити обережно, оскільки їх неправильне встановлення може призвести до нестабільності тестованої системи, що є неприпустимим [13].

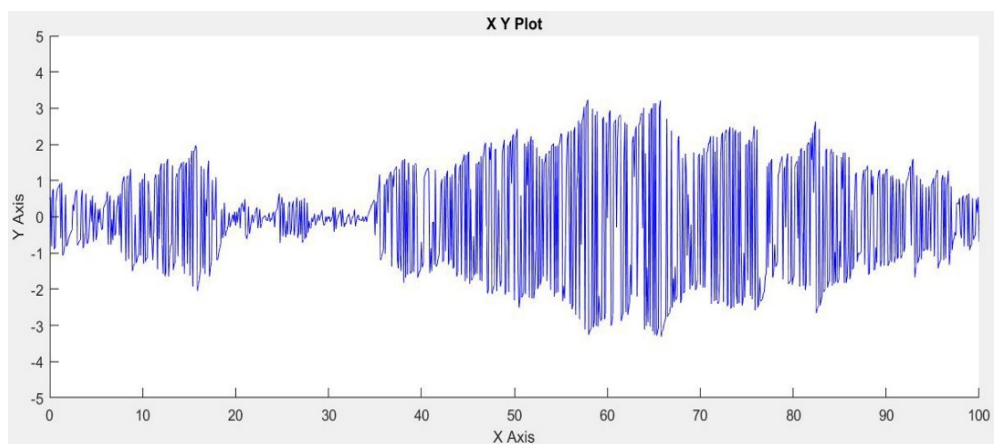
**Результати досліджень.** Результати імітаційного моделювання електричних характеристик функціональних покриттів дозволили визначити та дослідити зміну енергетичного розподілу електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів з різною електропровідністю (рисунок 3), а також зміну у величині такого заряду за час, протягом якого проводилося дослідження (рисунок 4).



a)



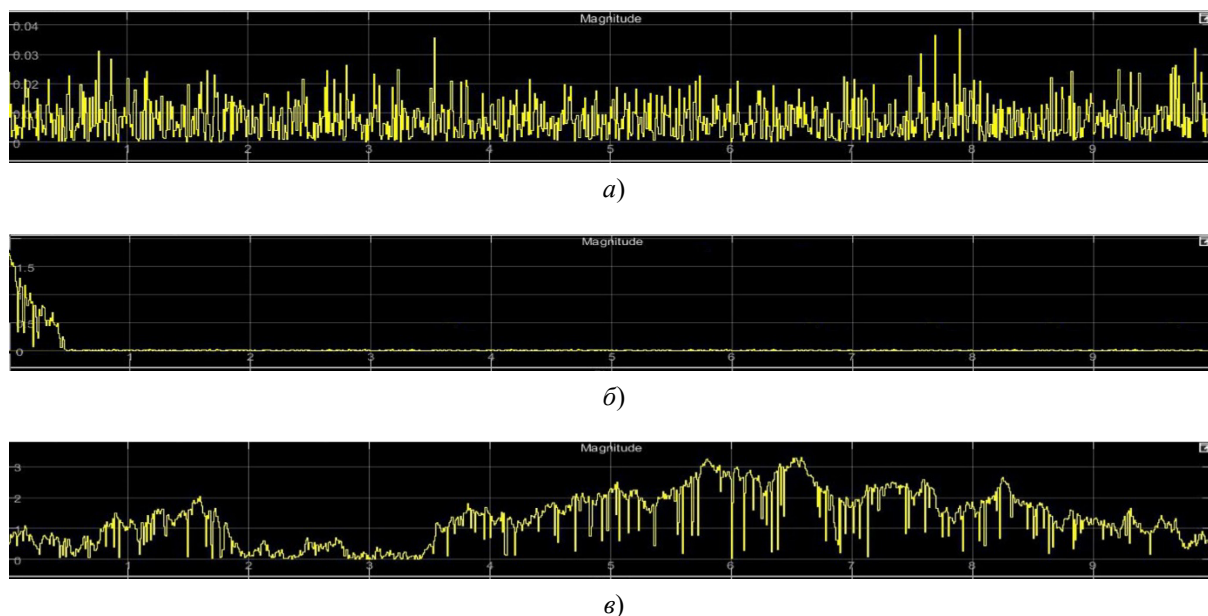
б)



в)

**Рисунок 3. Зміна розподілу енергії електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів за час вимірювання (10 с):**

- a) на провіднику (заземлене суцільне срібне покриття Ag-999 на діелектричній основі);
- б) на неполяризованому діелектрику (оптичне скло К-8);
- в) на поляризованому діелектрику (п'єзокераміка PZT-8)



**Рисунок 4. Зміна величини електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів за час вимірювання (10 с):**

- а) на провіднику (заземлене суцільне срібне покриття Ag-999 на діелектричній основі);
- б) на неполяризованому діелектрику (оптичне скло К-8);
- в) на поляризованому діелектрику (п'єзокераміка PZT-8)

У процесі аналізу зміни енергетичного розподілу залишкового електричного заряду в досліджуваній зоні (рисунок 3):

- у випадку заземленого провідника (рисунок 3, а) відсутній залишковий електричний сигнал (невеликі збурення кривої розподілу визначають шуми, спричинені електричною та магнітною дією зовнішніх полів, а також перешкоди з самою електронною схемою вимірювання);

- при дослідженні неполяризованого діелектрика (рисунок 3, б) спостерігається різке одноразове збурення електричного сигналу, яке відразу загасає. Таке збурення відповідає залишковому поверхневому заряду, накопиченому на поверхні неполяризованого діелектрика внаслідок зовнішньої електричної та механічної дії;

- у випадку поляризованого діелектрика (рисунок 3, в) спостерігаються заряд і розподіл величини електричного заряду. Проте, як бачимо, цей розподіл є періодичним з періодом  $T \approx 0,6-1,5$  с (рисунок 3, в, 4, в) (цей період відповідає діапазону робочих параметрів пристрою), що можна пояснити накопиченням і підтримкою залишкового заряду на поверхні матеріалу за рахунок накопиченої в матеріалі енергії електричного поля, а також динамічно змінною об'ємною електричною анізотропією, яка є особливістю поляризованих діелектриків.

Така динамічна зміна електричного поля всередині діелектрика також пояснює різний розподіл електричного сигналу (який імітує миттєвий заряд на тестовій поверхні в певний момент часу).

Подібна ситуація для різних матеріалів за електричними властивостями матеріалів спостерігається при дослідженні зміни фактичного значення електричного заряду в досліджуваній зоні (рисунок 4) [14]. Єдина відмінність в отриманні таких залежностей полягає в тому, що при дослідженні провідного матеріалу або неполяризованого діелектрика відсутній нульовий рівень вихідного сигналу, що генерується джерелом додаткового сигналу Ramp [15].

У процесі дослідження, аналізу та подальшого порівняння результатів імітаційної моделі з даними, отриманими експериментальним шляхом для певних режимів і моментів часу вимірювання, встановлено, що ці результати мають розбіжність 8–11,5 %, що доводить правильність та адекватність складеної імітаційної моделі.

**Висновки.** Таким чином, розроблена та апробована імітаційна модель інформаційно-вимірювальної системи електричних характеристик (залишковий електричний заряд поверхні, електроємність поверхневого шару тощо) функціональних покриттів електронних

пристроїв дозволяє досліджувати її роботу, а також віртуально визначити раціональні параметри роботи цієї системи.

*Наукова новизна* розробленої імітаційної моделі ІВС полягає в тому, що вперше запропоновано модель, яка дозволяє з високою точністю й адекватністю обирати режими дослідження функціональних покриттів електронних пристроїв шляхом урахування їх провідності, а також щільності розподілу електричного заряду по площі досліджуваної поверхні за амплітудно-частотними характеристиками в часі, чим дає змогу проводити інтерактивні дослідження електричних характеристик таких покриттів у режимі реального часу.

Випробування імітаційної моделі інформаційно-вимірювальної системи дозволили дослідити її роботу за різних умов і режимів проведення вимірювального експерименту, а також віртуально визначити раціональні параметри роботи вимірювально-керуючої системи.

Встановлено задовільну розбіжність експериментальних результатів 8–11,5 % порівняно з даними, отриманими методом імітаційного моделювання, що свідчить про коректність та адекватність розробленої імітаційної моделі.

*Практична цінність* проведених досліджень полягає у можливості проектування високоточних ІВС, що враховують результати проведеного імітаційного моделювання, чим забезпечують високу точність (відносна похибка визначення залишкового поверхневого електричного заряду не перевищує 8–8,5 %, а ємності поверхневого шару – не вище 4,5 %) та повторюваність (близько 0,998) результатів проведеного дослідження.

*В перспективі планується* на основі отриманих з імітаційної моделі даних про режими визначення електричних характеристик побудувати та дослідити реальну ІВС функціональних покриттів електронних пристроїв.

#### Список використаних джерел

[1] Ajit D. Kelkar, Daniel J. C. Herr, and James G. Ryan, *Nanoscience and Nanoengineering: Advances and Applications*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2014.

- [2] *Status of the MEMS industry 2018*. Lyon, France: Yole Development SARL, May 2018.
- [3] V. Tsenev, "An addition of functionalities in an integrated robot complex for assembling electronic products". *Innovations in discrete productions*, no. 1, pp. 34-35, 2016. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/journals/innovations/2016/1/34.full.pdf>
- [4] Yong Zhu, *Micro and Nano Machined Electrometers*. Singapore: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-3247-0.
- [5] J. Vedral, and M. Kriz, "Signal processing in partial discharge measurement", *Metrology and Measurement Systems*, no. 1 (17), pp. 55-63, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/v10178-010-006-8>
- [6] C. L. Wadhwa, *High Voltage Engineering*. New Delhi, India: New Age International, 2007.
- [7] A. Sabat, and S. Karmakar, "Simulation of partial discharge in high voltage power equipment", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, no. 3 (2), pp. 234-247, 2011.
- [8] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering*. London, GB: TBS, 2000.
- [9] A. Tzinevrakis, D. Tsanakas, and E. Mimos, "Analytical calculation of the electric field produced by single circuit power lines with horizontal arrangement of the conductors", in *51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Sept. 11-15, 2006.
- [10] Yu. Shi, G. Xie, Q. Wang, X. Li, X. Yang, P. Liu, and Z. Peng, "Simulation analysis and calculation of electric field distribution characteristics of UHV wall bushing", in *4th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy CEEGE*, Munich, June 10-13, 2021, pp. 110-117. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.066>
- [11] J. Junior, R. Marcos, C. Tenorio, A. Mateus, and C. Egoavil, "Development of a matlab software for real-time mapping of electric fields on transmission power line", *International Journal of Technology*, no. 2, pp. 164-170, 2011.
- [12] J. Nalepa, "Modelling and simulation of measuring systems using the Simulink specialised Toolbox", in *IX International*

- Syposium on Electrical Instruments in Industry*, Glasgow, 1997, pp. 249-252.
- [13] Д. В. Тичков, М. О. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Особливості розрахунку та дослідження ємнісних перетворювачів діелектричної проникливості з різною формою електродів", *Перспективні технології та прилади*, т. 14, с. 140-145, 2019.
- [14] М. А. Bondarenko, S. A. Bilokon, V. S. Antonyuk, and Iu. Iu. Bondarenko, "Mechanism of origin and neutralization of residual triboelectricity at scanning of dielectric surfaces by a silicon probe of the atomic-force microscope", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 2 (6), pp. 02018-1-02018-5, 2014.
- [15] D. K. Chaturvedi, *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781315218335>.
- ### References
- [1] Ajit D. Kelkar, Daniel J. C. Herr, and James G. Ryan, *Nanoscience and Nanoengineering: Advances and Applications*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2014.
- [2] *Status of the MEMS industry 2018*. Lyon, France: Yole Development SARL, May 2018.
- [3] V. Tsenev, "An addition of functionalities in an integrated robot complex for assembling electronic products". *Innovations in discrete productions*, no. 1, pp. 34-35, 2016. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/journals/innovations/2016/1/34.full.pdf>
- [4] Yong Zhu, *Micro and Nano Machined Electrometers*. Singapore: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-3247-0.
- [5] J. Vedral, and M. Kriz, "Signal processing in partial discharge measurement", *Metrology and Measurement Systems*, no. 1 (17), pp. 55-63, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/v10178-010-006-8>
- [6] C. L. Wadhwa, *High Voltage Engineering*. New Delhi, India: New Age International, 2007.
- [7] A. Sabat, and S. Karmakar, "Simulation of partial discharge in high voltage power equipment", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, no. 3 (2), pp. 234-247, 2011.
- [8] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering*. London, GB: TBS, 2000.
- [9] A. Tzinevrakis, D. Tsanakas, and E. Mimos, "Analytical calculation of the electric field produced by single circuit power lines with horizontal arrangement of the conductors", in *51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Sept. 11-15, 2006.
- [10] Yu. Shi, G. Xie, Q. Wang, X. Li, X. Yang, P. Liu, and Z. Peng, "Simulation analysis and calculation of electric field distribution characteristics of UHV wall bushing", in *4th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy CEEGE*, Munich, June 10-13, 2021, pp. 110-117. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.066>
- [11] J. Junior, R. Marcos, C. Tenorio, A. Mateus, and C. Egoavil, "Development of a matlab software for real-time mapping of electric fields on transmission power line", *International Journal of Technology*, no. 2, pp. 164-170, 2011.
- [12] J. Nalepa, "Modelling and simulation of measuring systems using the Simulink specialised Toolbox", in *IX International Symposium on Electrical Instruments in Industry*, Glasgow, 1997, pp. 249-252.
- [13] D. V. Tychkov, M. O. Bondarenko, and V. S. Antoniuk, "Peculiarities of calculation and research of capacitive dielectric permeability converters with different electrode shapes", *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, vol. 14, pp. 140-145, 2019 [in Ukrainian].
- [14] M. A. Bondarenko, S. A. Bilokon, V. S. Antonyuk, and Iu. Iu. Bondarenko, "Mechanism of origin and neutralization of residual triboelectricity at scanning of dielectric surfaces by a silicon probe of the atomic-force microscope", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 2 (6), pp. 02018-1-02018-5, 2014.
- [15] D. K. Chaturvedi, *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781315218335>.



**V. S. Tytarenko,**

e-mail: titarenko9494@gmail.com

**D. V. Tychkov**

Cherkasy State Technological University,  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## **SIMULATION MODEL OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF FUNCTIONAL COATINGS OF ELECTRONIC DEVICES**

*The article has developed and researched a simulation model (based on the MatLab Simulink mathematical processor) of the information-measuring system of electrical characteristics (residual surface electric charge, surface layer capacitance, etc.) of functional coatings of electronic devices. The main goal of this simulation model is to determine the rational parameters of measurement and control of the information-measuring system developed by the authors, which would simplify the process of setting up such a system, as well as to study the dynamic modes of its operation. The main advantage of the developed simulation model is the possibility of conducting an interactive study of the operation of the information-measuring system in various, including marginal, regimes. Testing of the simulation model of the information-measuring system makes it possible to investigate its operation under various conditions and regimes of the measurement experiment, as well as to virtually determine the rational parameters of the operation of such a measurement and control system. A satisfactory discrepancy of experimental results of 8-11.5% is established in comparison with the data obtained analytically, which confirms the correctness and adequacy of the developed model. The practical value of the conducted research lies in the possibility of designing high-precision information-measuring systems, that take into account the results of simulation modeling, thus ensuring high accuracy (the relative error of determining the residual surface electric charge does not exceed 8-8.5%, and the capacitance of the surface layer does not exceed 4.5%) and repeatability (about 0.998) of the results of the conducted research. In the future, it is planned to carry out hardware implementation and research of the information-measuring system of functional coatings of electronic devices, which will be created taking into account the data obtained from the simulation model about the modes of determining electrical characteristics.*

**Keywords:** *electronic device, functional coating, information-measuring system, electrical characteristic, simulation model.*

*Стаття надійшла 17.09.2022*

*Прийнято 07.10.2022*