

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 537.8.05

**ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ТОЧНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НАДМАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**<sup>1)</sup>Тичков Д. В., <sup>2)</sup>Волошко О. В.<sup>1)</sup>Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна<sup>2)</sup>Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

E-mail: [dmytro.tychkov@gmail.com](mailto:dmytro.tychkov@gmail.com); [voloshko\\_o@ukr.net](mailto:voloshko_o@ukr.net)

В статті наведені результати експериментального дослідження впливу температури, відносної вологості оточуючого середовища, а також коефіцієнта електромеханічної дії на процес визначення електричних полів надмалої потужності. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити найбільш раціональні умови визначення силових (електричної напруженості) та енергетичних (розподілу поверхневого заряду та електричної ємності) параметрів таких полів з більш високою точністю та надійністю. В роботі запропоновано дослідний експеримент зі встановлення точності та надійності силових та енергетичних параметрів визначення електричних полів в умовах зміни кліматичних факторів та електромеханічного коефіцієнта, реалізація якого відбулася на вимірювальному стенді, розробленому за участі авторів. Основним елементом такого вимірювального стенду є автоматичний пристрій визначення, збирання та оброблення інформації про розподіл силових та енергетичних параметрів електричного поля під чутливим елементом вимірювального датчика. Отримані внаслідок експериментального дослідження результати дозволили встановити, що коефіцієнт електромеханічного впливу має визначальний вплив на точність вимірювання електричних полів надмалої потужності. Показано, що збільшення коефіцієнта електромеханічного впливу від 38 нН/В (кремній <111>) до 190 нН/В (п'єзоелектрична кераміка PZT-8) веде до підвищення відносної похибки визначення електричного поля на 4,7%. Встановлено, що зменшення температури до 20 °С з одночасним дотриманням відносної вологості з 38% до 74% веде до зменшення відносної похибки на 1,5-2,2%. В той же час, зменшення температури з одночасним зменшенням відносної вологості веде до збільшення надійності визначення електричних полів (так, ймовірність безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів підвищується на 18%). Проведене порівняння результатів отриманих запропонованим методом з результатами, отриманими методом атомно-силової мікроскопії (в режимі вимірювання струмів витоку з робочих ділянок досліджуваних поверхонь), що показало сильну позитивну кореляцію між цими результатами, чим підтверджується об'єктивність запропонованого методу та адекватність отримуваних результатів. Висновки та проаналізовані дані, отримані в статті за результатами експериментальних досліджень, можуть бути використані для створення системи автоматичного корегування похибки та нестабільності визначення силових та енергетичних параметрів електричних полів надмалої потужності з урахуванням обмежуючих зовнішніх впливів.

**Ключові слова:** електричні поля; електрична напруженість; поверхневий заряд; фактори зовнішнього середовища; точність; надійність.

**Вступ**

На сучасному етапі розвитку технологій та технічних засобів, що лежить в основі стратегії Industry 4.0, найбільша увага провідних High-Tech виробників світу приділяється розширенню впливу в сучасній техніці таких галузей, як функціональна мікроелектроніка та прикладні нанотехнології [1, 2], де застосування сучасних концепцій та ідей, які базуються на квантовій теорії взаємодії перспективних матеріалів та електромагнітних полів, дозволяє виробам цих галузей стати ще

більш затребуваними та розповсюдженими у різних сферах нашого життя. Так, поширене використання подібних виробів дозволяє створювати більш потужні, швидкі, компактні та енергоефективні електронні пристрої, що в свою чергу сприяє підвищенню продуктивності та якості життя людей, а також зменшенню негативного впливу технологій на довкілля [3].

Проте, для ефективного використання та подальшого удосконалення сучасних електронних пристроїв необхідно вимірювати та контролювати

електричні поля надмалої потужності, що виникають в процесі роботи цих пристроїв [4]. Тому необхідно застосовувати точні та надійні методи вимірювання таких полів, які дозволяють забезпечити якість та стабільність роботи електронних пристроїв, зменшити енерго- та ресурсовитрати на їх виготовлення та гарантовано підвищити термін експлуатації таких пристроїв.

Окрім того, високоточне визначення електричних полів надмалої потужності є важливим завданням у наукових дослідженнях в галузях фізики, хімії та біології, що дозволяє вивчати взаємодію різноманітних за своєю природою матеріалів та об'єктів з електричними полями [5]. Тому, розробка нових та удосконалення існуючих високоточних та надійних методів і засобів визначення електричних полів надмалої потужності є вкрай важливим та перспективним напрямком наукових досліджень.

### Постановка проблеми

В роботі [6] розглядається необхідність проведення наукового дослідження, що присвячене своєчасному визначенню динамічних та статичних електричних полів, які виникають під час експлуатації діелектричних виробів мікро- та наносистемної техніки.

При цьому, слід зауважити, що питаннями визначення електричних полів надмалої потужності займаються дослідники з галузей електротехніки, фізики твердого тіла та електроніки. Серед українських вчених, які працюють у цих галузях, слід відмітити таких: В. М. Ляпунов, В. Д. Шарков, В. О. Шапран та інші [7, 8]. Закордонні дослідники, які займаються питаннями визначення електричних полів надмалої потужності, можуть бути представлені такими вченими, як Джон Боуен (John Bowen) з Великобританії, Ігор Бурбело (Igor Burban) з Польщі, Йоханнес Фінк (Johannes Fink) з Німеччини, Девід Педерсен (David Pederson) зі США та інші [9 – 11].

Проте, проаналізувавши праці фахівців в області дослідження електричних полів встановлено, що на сьогодні інформація, щодо впливу зовнішніх чинників (у тому числі, кліматичних) на такі метрологічні показники процесу вимірювання, як точність та надійність обмежена низкою невирішених питань.

Тому, подальший розвиток запропонованого методу визначення електричних полів надмалої потужності полягає в урахуванні таких зовнішніх факторів, як: температура та вологість оточуючого середовища, а також коефіцієнта електромеханічної дії (вплив яких притаманний для абсолютної більшості матеріалів функціональної електроніки, наноелектроніки та точного приладобудування) в процесі проведення досліджень, що дозволить покращити якість проведених вимірювань силових та енергетичних параметрів таких електричних полів,

збільшити точність та надійність цих вимірювань і є, в цілому, актуальним завданням.

*Метою роботи* є дослідження впливу температури, відносної вологості оточуючого середовища, а також коефіцієнта електромеханічної дії на процес визначення електричних полів надмалої потужності, що дозволяє встановити найбільш раціональні умови визначення силових (електричної напруженості) та енергетичних (розподілу поверхневого заряду та електричної ємності) параметрів таких полів з більш високою точністю та надійністю.

### Експериментальне обладнання та порядок проведення досліджень

Для встановлення точності та надійності силових та енергетичних параметрів визначення електричних полів надмалої потужності в умовах зміни кліматичних факторів та електромеханічного коефіцієнта, авторами розроблено вимірювальний стенд, що містить автоматичний пристрій визначення, збирання та оброблення інформації про розподіл силових та енергетичних параметрів електричного поля під чутливим елементом вимірювального давача [12]. В комплексі застосування такого стенду можна визначати напруженість електричного поля до 3 мВ/м, щільність розподілу електричного заряду порядку 1,9 – 8,0 нКл/мм<sup>2</sup> та електроємність під пластинами давача – від 3 пФ до 1 нФ. Загальний вигляд пристрою фіксації параметрів електричного поля, а також структурна та функціональна схеми вимірювального стенду наведені на рис. 1.

Представлений вимірювальний стенд дає можливість визначати силові та енергетичні характеристики електричних полів надмалої потужності в широкому діапазоні їх значень. Основними робочими параметрами такого стенду є: температура в робочій зоні +20...+90 °С (±0,5%); відносна вологість робочої зони 10...80% (±0,5%); електропружна жорсткість матеріалу до 10 ГПа (± 3,5%).

Основними елементами розробленого авторами вимірювального стенду є система керування та контролю, що включає контролер гнучкого регулювання параметрів зовнішнього середовища стендом, а також вимірювальний сенсор, який призначений для високоточного та надійного визначення електричної напруженості, розподілу електричного заряду та електроємності, як в безпосередній близькості від досліджуваної поверхні, так і в об'ємі простору.

Експериментальні дослідження проводили на кремнієвій поверхні, підготованій до електронної літографії, а також на поверхнях елементів пам'яті EEPROM, які за даними аналітичної компанії MarketsandMarkets [13], що на сьогодні знайшли найширше застосування в схемотехніці та приладобудуванні в якості запам'ятовуючих пристроїв сучасної комп'ютерної техніки.

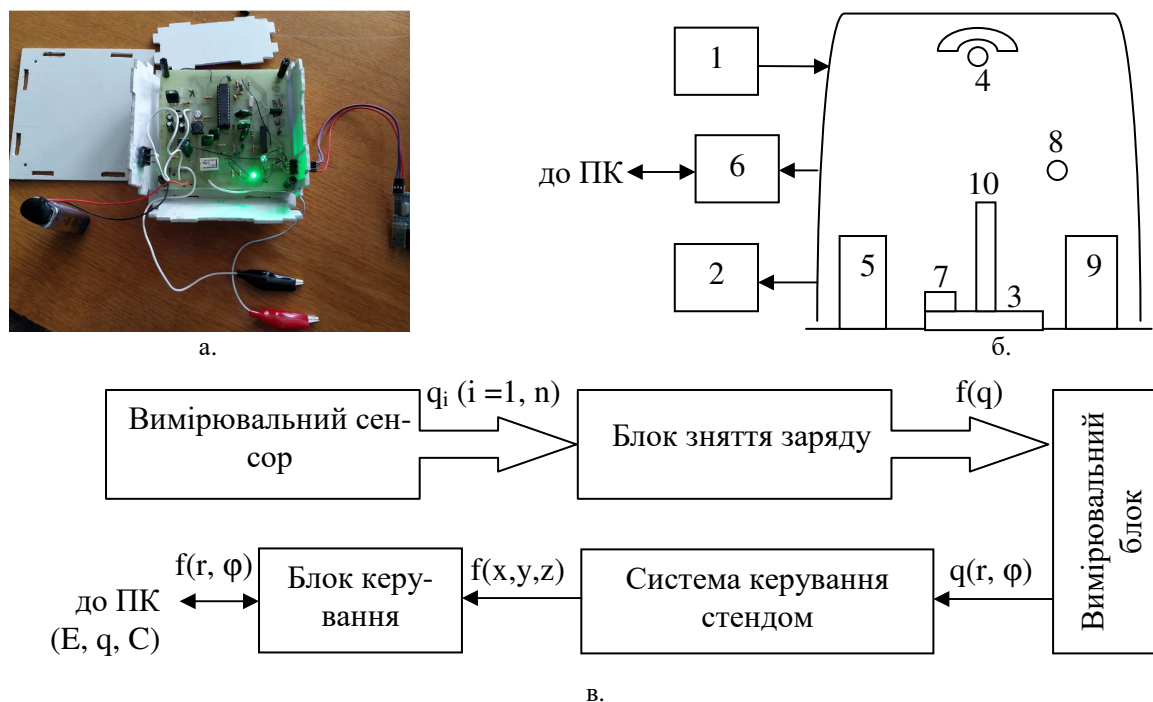


Рис. 1. Загальний вигляд пристрою фіксації силових та енергетичних параметрів електричного поля (а), структурна (б) та функціональна (в) схеми вимірювального стенду: 1 – інтерфейс регулювання параметрів; 2 – індикатор стану роботи стенду; 3 – платформа для встановлення дослідного зразка; 4 – кварцові лампи КГ-1000; 5 – зволожувач/осушувач повітря в робочій зоні; 6 – пристрій фіксації силових та енергетичних параметрів електричного поля; 7 – електромеханічний тензосенсор; 8 – термопары; 9 – гігрометричний датчик; 10 – вимірювальний сенсор

Порядок проведення експериментальних досліджень полягав в наступному. Дослідний зразок розташовується на спеціальній платформі (поз. 3, рис. 1) в зоні випробування вимірювального стенду. На зразку, в досліджуваному місці розташовується вимірювальний зонд та електромеханічний тензодатчик (для визначення коефіцієнту електромеханічної дії) (поз. 7, рис. 1). Далі, після підключення до ПК, на останньому запускається спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє встановити необхідні значення (що можна зробити також за допомогою інтерфейсу (поз. 1, рис. 1)) та гнучко керувати зовнішніми параметрами (температурою – встановлюється за допомогою кварцових ламп (поз. 4, рис. 1) та контролюється термопарами (поз. 8, рис. 1); відносною вологістю – встановлюється з використанням зволожувача/осушувача повітря в робочій зоні (поз. 5, рис. 1) та контролюється електронним гігрометричним датчиком (поз. 9, рис. 1); електромеханічною взаємодією – забезпечується електромагнітним навантажувачем та контролюється за допомогою електромеханічного тензосенсора (поз. 7, рис. 1)). Отримуваний в результаті випробувань на вимірювальному стенді розподіл значень електричного заряду (вимірювальний сенсор (поз. 10, рис. 1)) передається на пристрій фіксації параметрів елек-

тричного поля (поз. 6, рис. 1), де накопичується та передається далі – на керуючий ПК. Проміжні виміряні значення, а також режим роботи стенду (поточна температура, відносна вологість та електромеханічний коефіцієнт) паралельно з монітором ПК відображається на індикаторі (поз. 2, рис. 1). Після завершення дослідних випробувань, ПК автоматично вимикає блоки регулювання і контролю параметрами вимірювального стенду, після чого автоматично завершує роботу спеціалізованого ПЗ, і врешті дослідний зразок можна прибирати із зони дослідження.

Для порівняння результатів розподілу електричного заряду, які отримані на вимірювальному стенді, використовувався атомно-силовий мікроскоп, що працював в режимі вимірювання струмів витоку з робочих ділянок досліджуваних поверхонь (використаний пристрій – атомно-силовий мікроскоп NT-206) [14].

Для підвищення достовірності результатів дослідження, вимірювання параметрів статичного електричного поля проводилися не менше ніж в 25 випадкових точках обраних випадковим чином на 10 однотипних зразках, за однакових умов дотримання температури, відносною вологості та електромеханічного впливу на зразок з боку зовнішнього середовища.

### Аналіз отриманих результатів

В результаті проведених досліджень з використанням вимірювального стенду експериментально встановлено вплив зовнішніх факторів (тем-

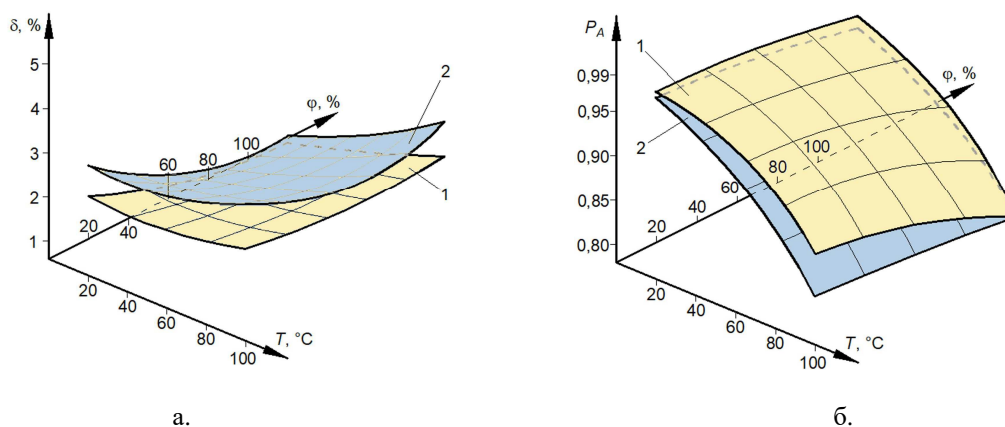


Рис. 2. Залежності відносної похибки ( $\delta$ , %) та ймовірності безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів ( $P_A$ ) від температури ( $T$ ) та відносної вологості оточуючого середовища ( $\phi$ ) за різних граничних значень коефіцієнту електромеханічного впливу: 1 – для  $K_{em} = 38$  пН/В, що відповідає кремнію <111>; 2 – для  $K_{em} = 190$  пН/В, що відповідає п'єзоелектричній кераміці марки PZT-8

Так, на рис. 2 наведені тривимірні залежності відносної похибки ( $\delta$ , %) та ймовірності безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів ( $P_A$ ) від температури ( $T$ ) та відносної вологості оточуючого середовища ( $\phi$ ).

Як можна побачити із залежностей наведених на рис. 2, більш суттєвий вплив, як на відносну похибку вимірювання, так і на ймовірності безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів здійснює температура оточуючого середовища. Так, зменшення температури зі 100 °С до 20 °С призводить до зменшення відносної похибки з 3,2-3,7 % до 2,5-2,7 % при дослідженні п'єзоелектричної кераміки (для випадку кремнію, відносна похибка зменшувалася з 1,5-2,2 % до 1,2-1,8 %), рис. 2, а. Для випадку ймовірності безвідмовного вимірювання електричних полів, вищезазначене зменшення температури (зі 100 °С до 20 °С) дозволило підвищити ймовірність безвідмовного вимірювання з 0,81 до 0,96 при дослідженні п'єзоелектричної кераміки (для випадку кремнію, ймовірність безвідмовного вимірювання збільшувалася з 0,81-0,84 до 0,97-0,99), рис. 2, б. Такий вплив температури, на думку авторів, пов'язаний зі збільшенням теплової рухливості носіїв заряду на досліджуваній поверхні, а також прискореною екзоemisією електронів з неї. З іншого боку, підвищення температури веде до зміни електричних характеристик (опору, поверхневої провідності, накопичувальної здатності тощо) і само вимірювального давача, що потребує додаткового корегування вимірюваних даних.

В той же час встановлено, що зміна відносної вологості має несуттєвий вплив, як на відносну похибку, так й на ймовірність безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електрич-

ператури та відносної вологості оточуючого середовища, а також коефіцієнту електромеханічної дії) на точність та надійність визначення електричних полів надмалої потужності, рис. 2, рис. 3.

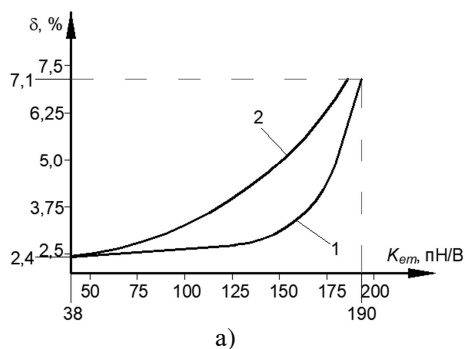
них полів, які, в загальному випадку, можуть змінюватися до 0,4 % (для відносної похибки) та в діапазоні 0,01-0,04 (для ймовірності вимірювання), рис. 2.

Окрім дослідження впливу температури та вологості оточуючого середовища, на точність та надійність вимірювань електричних полів, в роботі досліджувалася залежність цих метрологічних показників процесу вимірювання від електромеханічних властивостей досліджуваного матеріалу. Тому на рис. 3 наведені залежності відносної похибки ( $\delta$ , %) та ймовірності безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів ( $P_A$ ) від коефіцієнту електромеханічного впливу (в діапазоні значень, що відповідає більшості сучасних матеріалів, які використовуються в мікроелектроніці) для граничних значень температури та відносної вологості оточуючого середовища.

Як можна побачити із залежностей, наведених на рис. 3, коефіцієнт електромеханічного впливу має визначальний вплив на точність вимірювання електричних полів. Так, збільшення коефіцієнту електромеханічного впливу від 38 пН/В (відповідає кремнію <111>) до 190 пН/В (характерний для п'єзоелектричної кераміки PZT-8) призводить до збільшення відносної похибки визначення електричного поля з 2,4 % до 7,1 %.

Водночас, ймовірності безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів ( $P_A$ ) від коефіцієнту електромеханічного впливу досліджуваних матеріалів підвищувалася з 0,81-0,825 до 0,95-0,99 (така розбіжність крайніх значень коефіцієнту електромеханічного впливу відповідає мінімальним ( $T = 20$  °С,  $\phi = 0\%$ ) та максимальним ( $T = 100$  °С,  $\phi = 100\%$ ) значенням тем-

пературі та відносній вологості оточуючого сере-



довища).

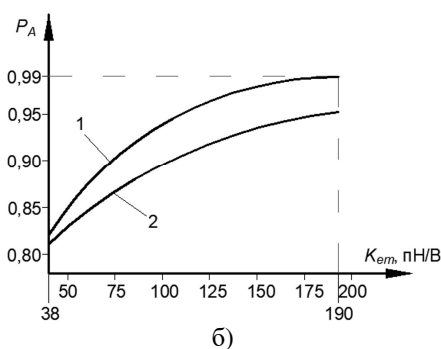


Рис. 3. Залежності відносної похибки ( $\delta$ , %) та ймовірності безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів ( $P_A$ ) від коефіцієнту електромеханічного впливу досліджуваних матеріалів ( $K_{em}$ ) для граничних значень температури ( $T$ ) та відносної вологості оточуючого середовища ( $\phi$ ): 1 – для  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\phi = 0\%$ ; 2 – для  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $\phi = 100\%$

Отже, побудовані залежності (на рис. 2 та на рис. 3) дозволяють визначити найбільш раціональні зовнішні умови для визначення силових (електричної напруженості) та енергетичних (розподілу поверхневого заряду та електричної ємності) параметрів таких полів (температура  $T$  – не більше  $42^\circ\text{C}$ , відносна вологість  $\phi$  – в діапазоні значень  $38\text{--}74\%$ , коефіцієнт електромеханічної дії  $K_{em}$  – менше  $50\text{ пН/В}$ ) з високою точністю (відносна похибка: при дослідженні п'єзоелектричної кераміки –  $2,5\text{--}2,7\%$ ; при дослідженні кремнію –  $1,2\text{--}1,8\%$ ) та надійністю (ймовірності безвідмовного вимірювання –  $0,96\text{--}0,99$ ).

В той же час, для підтвердження отриманих запропонованим методом [6] результатів визначення силових та енергетичних параметрів електричних полів надмалої потужності, ці результати порівнювалися з результатами визначення таких параметрів альтернативним методом, в якості якого запропоновано метод атомно-силової мікроскопії (АСМ), за допомогою якого вимірювання здійснювалися в режимі визначення струмів витоку з робочих ділянок досліджуваних поверхонь (рис. 4).

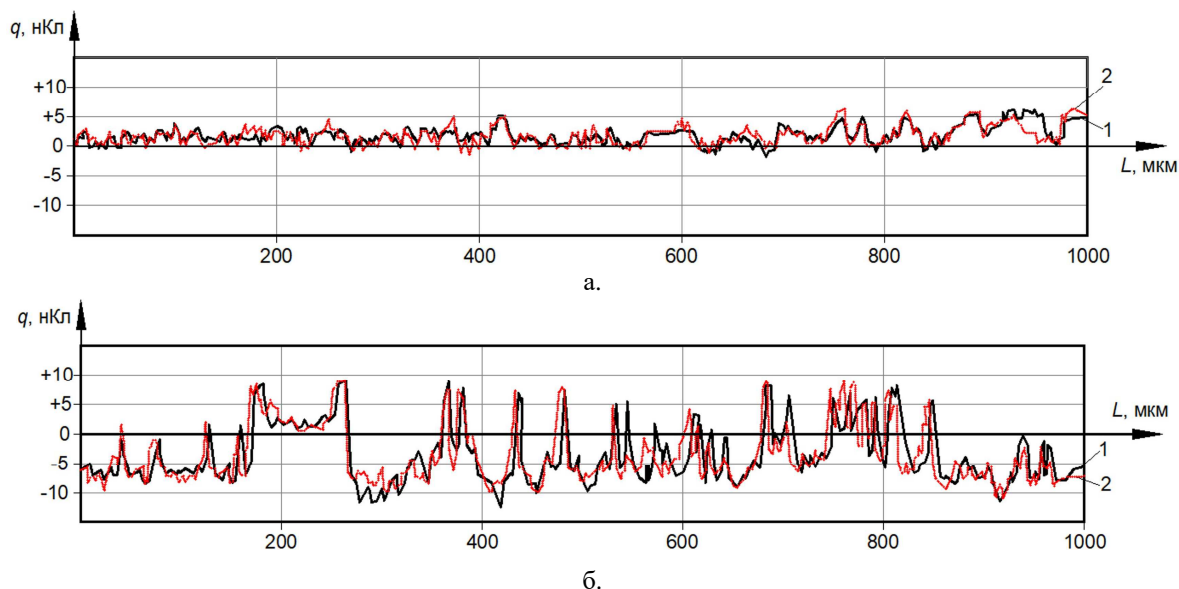


Рис. 4. Розподіл електричного заряду вздовж поверхні дослідних зразків (а – поверхня кремнієвої  $\langle 111 \rangle$  пластини; б – поверхня елемента пам'яті EEPROM) отриманий запропонованим авторами методом (1) та методом АСМ в режимі вимірювання струмів витоку (2)

Проаналізувавши рис. 4, можна побачити значну позитивну кореляцію між результатами, отриманими запропонованим авторами статті методом та результатами, отриманими методом АСМ

(в режимі вимірювання струмів витоку з робочих ділянок досліджуваних поверхонь) (коефіцієнт кореляції  $r$  – не менше  $0,81$ ), що підтверджує об'єктивність авторського методу та адекватність отримуваних результатів.



Встановлені внаслідок експериментального дослідження умови проведення вимірювань електричних полів надмалої потужності дозволили забезпечити найбільш точне та надійне визначення силових (електричної напруженості) та енергетичних (розподілу поверхневого заряду та електричної ємності) параметрів таких полів, що підтверджено адекватністю та об'єктивністю процесу вимірювання [15].

Отже, в результаті проведених досліджень щодо впливу таких зовнішніх факторів, як температура, відносна вологість та електромеханічний вплив на точність та надійність визначення електричних полів надмалої потужності встановлено, що коефіцієнт електромеханічного впливу має визначальний вплив на точність вимірювання таких полів. Так, збільшення коефіцієнта електромеханічного впливу від 38 пН/В (відповідає кремнію <111>) до 190 пН/В (п'єзоелектрична кераміка PZT-8) призводить до збільшення відносної похибки визначення електричного поля з 2,4 % до 7,1 %.

В той же час було встановлено, що збільшення температури до 100 °С та одночасне зменшення відносної вологості від 38 % до 0 %, або, навпаки, збільшення відносної вологості від 74 % до 100 % призводить до збільшення відносної похибки з 1,2-1,5 % до 2,7-3,7 %. Водночас, зменшення температури від 100 °С до 20 °С з одночасним зменшенням відносної вологості призводить до збільшення надійності визначення електричних полів (ймовірності безвідмовного вимірювання силових та енергетичних параметрів електричних полів підвищуються з 0,81 до 0,99).

Отримані результати є важливими для практичного застосування запропонованого авторами методу вимірювання електричних полів надмалої потужності, що може бути рекомендований для контролю електричних параметрів компонентів виробів мікро- та наносистемної техніки в процесі їх виготовлення та експлуатації.

### Висновки

Отримані результати окреслюються наступним.

1. Встановлено, що коефіцієнт електромеханічного впливу має визначальний вплив на точність вимірювання електричних полів надмалої потужності. Так, збільшення коефіцієнта електромеханічного впливу від 38 пН/В (відповідає кремнію <111>) до 190 пН/В (п'єзоелектрична кераміка PZT-8) призводить до підвищення відносної похибки визначення електричного поля на 4,7 %.

2. Показано, що збільшення температури до 100 °С та одночасне зменшення відносної вологості від 38 % до 0 %, або, навпаки, збільшення відносної вологості від 74 % до 100 % призводить до збільшення відносної похибки на 1,5-2,2 %. При цьому, зменшення температури від 100 °С до 20 °С з одночасним зменшенням відносної вологості веде до збільшення надійності визначення електричних полів (ймовірності безвідмовного вимірю-

вання силових та енергетичних параметрів електричних полів підвищуються на 18 %).

3. Проведене порівняння результатів отриманих запропонованим методом з результатами, отриманими методом АСМ (в режимі вимірювання струмів витoku з робочих ділянок досліджуваного поверхонь), що показало значну позитивну кореляцію між цими результатами (коефіцієнт кореляції  $r \geq 0,81$ ), чим підтверджується об'єктивність запропонованого методу та адекватність отримуваних результатів.

Подальші перспективні дослідження в рамках продовження цієї наукової роботи будуть спрямовані на створення системи автоматичного корегування похибки та нестабільності визначення силових та енергетичних параметрів електричних полів надмалої потужності з урахуванням обмежувальних зовнішніх впливів.

### Література

- [1] О. М. Охріменко, В. С. Синиця, В. А. Бородин, та Ю. О. Крутюк, "Формування інноваційного кластеру в електронній промисловості на засадах функціональної мікроелектроніки", *Системні дослідження та інформаційні технології*, Вип. 3, С. 24–34, 2019.
- [2] M. V. Petrov, V. I. Koval, T. P. Yakimova, M. V. Skorohodov, and I. A. Yarygin, "Development of an algorithm for evaluating the effectiveness of the implementation of information systems in industry 4.0", *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2692, pp. 268–277, 2020.
- [3] G. Fagas and G. Kaniadakis, Eds., *Semiconductor Nanomaterials: Fundamentals and Applications*. Switzerland: Springer Nature, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-78292-4.
- [4] Y. Xinyi, J. Yunfei, G. Lu, J. Shengchang, L. Zhibing, "A method for measuring surface electric field intensity of insulators based on electroluminescent effect", *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1537 – 1543, 2020. DOI: 10.1016/j.egy.2020.10.056.
- [5] J. C. Vanegas Acosta, "Electric fields and biological cells: numerical insight into possible interaction mechanisms" [Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Electrical Engineering], Technische Universiteit Eindhoven, 2015.
- [6] Д. В. Тичков, М. О. Бондаренко, "Дослідження динамічних електричних полів, що виникають внаслідок зовнішніх впливів на діелектричних поверхнях мікро- та нановиробів", на *VIII Міжнар. наук.-техн. конф. Датчики, прилади та системи – 2019*, Лазурне, 2019.
- [7] A. G. Slivka, V. M. Kedyulich, R. R. Levitskii, A. P. Moina, M. O. Romanyuk, A. M. Guivan, "The effect of external factors on dielectric permittivity of Rochelle salt: humidity, annealing, stresses, electric field", *Condensed Matter Physics*, vol. 8, no. 3 (43), pp. 623 – 638, 2005.
- [8] В. Д. Шапков, Є. В. Дяцюк, "Моделювання і аналіз методів визначення електричних полів

- надмалої потужності в обладнанні для зварювання", *Електротехніка та електромеханіка*, Вип. 5, С. 12-17, 2020.
- [9] J. Fink, "Nanosecond pulsed electric fields: fundamentals and applications", CRC Press, 2020.
- [10] I. Burban, V. Terzija, P. Marusak, "A Method for the Calculation of the Electric Field Strength in Power Transformers Based on the Finite Element Method", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 4, pp. 1738-1745, 2020.
- [11] D. Pederson, W. Radasky, R. Pritchett, "High-Power Electromagnetic Radiation and Its Effects on Electronic Systems", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 3, pp. 827-838, 2021.
- [12] В. С. Титаренко та Д. В. Тичков, "Імітаційна модель інформаційно-вимірювальної системи електричних характеристик функціональних покриттів електронних пристроїв", *Вісник ЧДТУ*, Вип. 3, с. 14–22.
- DOI: 10.24025/2306-4412.3.2022.265745.
- [13] MarketsandMarkets. "Non-Volatile Memory Market by Type (Flash, MRAM, EPROM, EEPROM), End-User Industry (Consumer Electronics, Automotive, Aerospace & Defense, Healthcare, Enterprise Storage), and Geography (Asia Pacific, North America, Europe, Rest of the World) - Global Forecast to 2022" [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/non-volatile-memory-market-1371262.html>. [Accessed: 30.03.2023].
- [14] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. О. Андрієнко, "Переваги використання методу атомно-силової мікроскопії в діагностиці нанооб'єктів та систем", на *X міжнар. наук.-практ. конф. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018)*, Київ, 2018.
- [15] DSTU ISO 5725-(1-6):2005 Accuracy (correctness and precision) methods and results of measurements. Part 1 – Part 6.

UDC 537.8.05

<sup>1)</sup> **D. V. Tychkov**, <sup>2)</sup> **O. V. Voloshko**<sup>1)</sup> *Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*<sup>2)</sup> *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE ACCURACY AND RELIABILITY OF THE DETERMINATION OF ULTRA-LOW POWER ELECTRIC FIELDS**

The article presents the results of an experimental study of the influence of temperature, relative humidity of the surrounding environment, as well as the coefficient of electromechanical action on the process of determining ultra-low power electric fields. The analysis of the obtained results made it possible to establish the most rational conditions for determining the force (electrical tension) and energy (distribution of surface charge and electric capacity) parameters of such fields with higher accuracy and reliability. The paper proposes an experimental experiment to establish the accuracy and reliability of power and energy parameters for determining electric fields under conditions of changes in climatic factors and the electromechanical coefficient, the implementation of which took place on a measuring stand developed with the participation of the authors. The main element of such a measuring stand is an automatic device for determining, collecting and processing information on the distribution of power and energy parameters of the electric field under the sensitive element of the measuring transducer. The results obtained as a result of the experimental research made it possible to establish that the coefficient of electromechanical influence has a decisive influence on the accuracy of measuring electric fields of ultra-low power. It is shown that an increase in the coefficient of electromechanical influence from 38 pN/V (silicon <111>) to 190 pN/V (PZT-8 piezoelectric ceramics) leads to an increase in the relative error of electric field determination by 4.7%. It was established that reducing the temperature to 20 °C while maintaining the relative humidity from 38 % to 74 % leads to a decrease in the relative error by 1.5-2.2 %. At the same time, a decrease in temperature with a simultaneous decrease in relative humidity leads to an increase in the reliability of the determination of electric fields (so, the probability of error-free measurement of power and energy parameters of electric fields increases by 18 %). A comparison of the results obtained by the proposed method with the results obtained by atomic force microscopy method (in the mode of measuring the leakage currents from the working areas of the investigated surfaces) was carried out, which showed a strong positive correlation between these results, which confirms the objectivity of the proposed method and the adequacy of the obtained results. The conclusions and analyzed data obtained in the article based on the results of experimental studies can be used to create a system of automatic error correction and instability determination of power and energy parameters of ultra-low power electric fields, taking into account limiting external influences.

**Key words:** electric fields; electric voltage; surface charge; environmental factors; accuracy; reliability.Надійшла до редакції  
03 квітня 2023 рокуРецензовано  
02 травня 2023 року© 2023 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).