УДК 621.3.08 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.04.095

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТАНГЕНСА КУТА ВТРАТ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ МІР ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЄМНОСТІ

С.М. Шевкун[1*], канд. техн. наук, **В.П. Квасніков**[2**], докт. техн. наук,
М.В. Добролюбова[3***], канд. техн. наук, , **О.В. Стаценко**[3****], канд. техн. наук, **М.С. Шевкун**[4]

[1] **Державне підприємство "Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів",**
вул. Метрологічна, 4, Київ, 03143, Україна.
[2] **Державний університет "Київський авіаційй інститут",**
пр. Любомира Гузара, 1, Київ, 03058, Україна.
[3] **НТУ України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",**
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.
[4] **PEOPLe: Projects to Empower & Organize the Psychiatrically Labeled, Inc.,**
Нью-Палц, 22 N Оуквуд-Террас, Нью-Йорк, 12561, США.
E-mail: shevkun@ukrcsm.kiev.ua; volodymyr.kvasnikov@npp.kai.edu.ua; m.v.dobroliubova@gmail.com; o.statsenko@kpi.ua; mshevkun.dev@gmail.com.

Розглянуто методичний та метрологічний підхід до калібрування прецизійних мір електричної ємності за тангенсом кута діелектричних втрат на Державному первинному еталоні одиниць електричної ємності та фактора втрат. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення високої точності вимірювань параметрів ємності та втрат у конденсаторах, що широко застосовуються у вимірювальній техніці, енергетиці, телекомунікаційних системах тощо, насамперед, у засобах контролю електроізоляції. Тангенс кута втрат є важливою характеристикою діелектричних матеріалів і конденсаторів, яка визначає рівень енергетичних втрат у діелектрику та істотно впливає на точність вимірювання комплексного імпедансу, а також на результати діагностики електроізоляційних систем.
У роботі наведено структурну схему вимірювань, що використовується для калібрування прецизійних мір ємності за тангенсом кута втрат, та описано принцип її функціонування. Розроблено математичну модель вимірювань, яка враховує основні складові, що впливають на результат визначення тангенса кута втрат, зокрема параметри вимірювального моста, похибки квадратурного сигналу, вплив нестабільності частоти та напруги живлення, а також паразитні втрати в елементах вимірювального тракту. Подано модельне рівняння вимірювання та здійснено детальну інтерпретацію фізичного змісту його складових.
Особливу увагу приділено аналізу джерел невизначеності вимірювань та формуванню бюджету невизначеності для процедури калібрування. Наведено приклад розрахунку сумарної стандартної та розширеної невизначеності результату калібрування прецизійної міри ємності за тангенсом кута втрат. Отримані результати можуть бути використані задля розроблення методик калібрування мір ємності за тангенсом кута втрат та забезпечення метрологічної простежуваності вимірювань параметрів електричних конденсаторів до Державного первинного еталона. Бібл. 20, рис. 5, табл. 1.
***Ключові слова*:** бюджет невизначеності, міра ємності, модель вимірювань, державний первинний еталон, прецизійний конденсатор, простежуваність вимірювань, тангенс кута втрат, фактор втрат.

Вступ. Вимірювання електричної ємності та параметрів втрат у діелектричних матеріалах є важливою складовою сучасної метрології, що розглядає вимірювання електромагнітних величин. Однією з основних характеристик конденсаторів та діелектриків є тангенс кута діелектричних втрат, який визначає відношення активної складової струму, зумовленої втратами енергії в діелектрику, до реактивної складової, пов'язаної з накопиченням електричної енергії в електричному полі. Значення цієї величини характеризує ефективність діелектрика та є важливим показником якості ізоляційних матеріалів і конденсаторів [1].

© Шевкун С.М., Квасніков В.П., Добролюбова М.В., Стаценко О.В., Шевкун М.С., 2026
ORCID: * https://orcid.org/0000-0003-1923-6227; ** https://orcid.org/0000-0002-6525-9721;
*** https://orcid.org/0000-0003-3647-3320; **** https://orcid.org/0000-0001-8730-2789
© Видавець ВД «Академперіодика», НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

Природна суть тангенсу кута втрат полягає в наступному. У реальному конденсаторі діелектрик не є ідеальним. Через це з'являється активна складова струму, яка пов'язана з втратами енергії в діелектрику. Тангенс кута втрат не залежить від геометричних розмірів об'єкта, а характеризує структуру самого діелектрика.

Ідеальний конденсатор не проводить постійний струм, а під час проходження крізь нього змінного струму сила струму упереджує напругу на 90° за фазою. Для реального конденсатора це упередження дещо менше. Різниця між ідеальним значенням упередження 90° та реальним його значенням називається кутом діелектричних втрат.

Кут діелектричних втрат δ зображено на рис. 1.

Зазвичай конденсатор моделюють як ідеальну ємність C з паралельним підключенням ідеального активного опору, який обумовлює втрати R_{loss}. Еквівалентну схему такого конденсатора зображено на рис. 2.

У такій моделі тангенс кута втрат визначається як відношення активної складової струму до реактивної

$$tg\delta = I_R / I_C .$$

Конденсатор також може мати еквівалентну схему з послідовним підключенням опору втрат R_{loss} та ідеальної ємності C. Послідовну еквівалентну схему зображено на рис. 3.

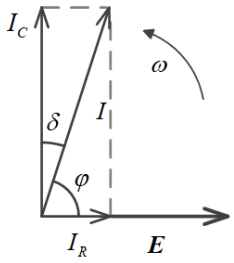


Рис. 1

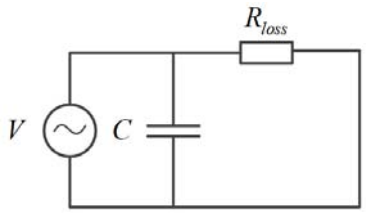


Рис. 2

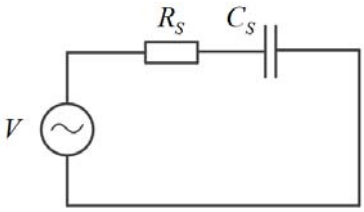


Рис. 3

Тоді тангенс кута втрат визначається формулою

$$tg\delta = \omega C R_S ,$$

де $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; C – ємність; R_S – еквівалентний послідовний опір втрат.

Для еталонних повітряних, газонаповнених або кремнієвих конденсаторів значення тангенсу кута втрат дуже малі – від 1×10^{-8} до 1×10^{-5}, тому вимірювання $tg\delta$ набагато складніше, ніж вимірювання самої ємності.

Контроль тангенса кута втрат широко застосовується у вимірювальній техніці, електроенергетиці, телекомунікаціях та інших галузях, де використовуються конденсатори з високими вимогами до стабільності параметрів [2, 3]. Зокрема, ця величина використовується задля оцінювання стану електричної ізоляції високовольтного обладнання, діагностики трансформаторів, кабельних ліній і конденсаторних установок. Підвищення значення тангенса кута втрат може свідчити про старіння або деградацію діелектрика, наявність вологи, часткових розрядів чи інших дефектів ізоляції. У зв'язку з цим точні вимірювання цього параметра мають важливе значення задля забезпечення надійності роботи електротехнічного обладнання, у тому числі об'єктів критичної інфраструктури.

Задля забезпечення достовірності результатів вимірювань необхідно гарантувати їх метрологічну простежуваність до міжнародних та національних еталонів одиниць вимірювання [4].

Разом з тим процедура калібрування прецизійних мір ємності за тангенсом кута втрат пов'язана з низкою складних метрологічних задач [5, 6]. До них належать вплив паразитних втрат у вимірювальному тракті, похибки формування квадратурної складової сигналу, нестабільність частоти та напруги збудження, а також вплив температури та інших зовнішніх факторів на результати вимірювань. Додаткові труднощі виникають під час побудови математичної моделі вимірювання та коректної оцінки невизначеності результату калібрування, оскільки величина тангенса кута втрат для прецизійних конденсаторів має дуже малі значення.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення та вдосконалення методичного підходу до калібрування прецизійних мір ємності за тангенсом кута втрат, побудови адекватної моделі вимірювання та

формування обґрунтованого бюджету невизначеності. Саме вирішенню зазначених питань присвячено дану статтю.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

– вперше запропоновано методичний підхід до калібрування прецизійних мір електричної ємності за тангенсом кута втрат на Державному первинному еталоні одиниць електричної ємності та фактора втрат, який, на відміну від існуючих, базується на застосуванні сучасної теорії оцінювання невизначеності вимірювань відповідно до вимог міжнародних керівних документів JCGM [7] та EA [8], що забезпечує міжнародне визнання результатів калібрування та підвищує їх точність;

– побудовано розширену математичну модель вимірювання, яка, на відміну від існуючих, дає змогу адекватно врахувати одночасний вплив усіх джерел похибок вимірювань та сформувати обґрунтований бюджет невизначеності.

1. Обґрунтування необхідності розробки методичного підходу до калібрування мір ємності за тангенсом кута втрат на Державному первинному еталоні. Сучасний розвиток національної системи забезпечення єдності вимірювань в Україні відбувається в умовах активної європейської інтеграції та гармонізації технічного регулювання з законодавством Європейського Союзу. Одним із ключових елементів цієї системи є забезпечення метрологічної простежуваності результатів вимірювань до одиниць Міжнародної системи одиниць (SI) [9] через національні еталони. Відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO/IEC 17025 [10] лабораторії зобов'язані забезпечувати простежуваність результатів вимірювань через документований безперервний ланцюг калібрувань, кожен з яких робить внесок у сумарну невизначеність вимірювання.

У цьому контексті особливого значення набуває розвиток і вдосконалення методичного підходу до калібрування еталонних і прецизійних мір електричної ємності, зокрема за параметром тангенса кута втрат (dissipation factor, $tg\delta$). Даний параметр характеризує втрати енергії в діелектрику конденсатора і є важливою характеристикою під час використання конденсаторів як еталонів у прецизійних вимірюваннях електричного імпедансу. Наявність достовірної інформації про тангенс кута втрат є необхідною умовою задля забезпечення високої точності вимірювань у галузях електричної метрології, зокрема під час калібрування імпедансних мостів, вимірювачів ємності та інших високоточних засобів вимірювальної техніки.

Важливість впровадження такого методичного підходу обумовлена необхідністю міжнародного визнання результатів вимірювань, отриманих у національних метрологічних інститутах. Україна є учасником міжнародної метрологічної інфраструктури, зокрема підписантом Угоди про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювань (CIPM MRA) [11], що створює основу для міжнародного визнання результатів вимірювань і калібрувань. У рамках цієї угоди підтвердження метрологічних можливостей національних метрологічних інститутів здійснюється через міжнародні звірення, що забезпечують еквівалентність національних еталонів різних країн і, відповідно, довіру до результатів калібрування.

Розроблення та впровадження національних методик калібрування на основі запропонованого підходу також сприятиме усуненню технічних бар'єрів у міжнародній торгівлі, оскільки міжнародне визнання результатів вимірювань дає змогу забезпечити взаємне прийняття результатів випробувань і калібрувань між країнами. Це, у свою чергу, сприяє інтеграції України до європейського економічного простору та підвищує конкурентоспроможність української продукції на міжнародних ринках.

Незважаючи на значний розвиток електричної метрології, питання калібрування мір ємності за тангенсом кута втрат і оцінювання невизначеності таких вимірювань залишаються складними науково-технічними задачами. Це пов'язано з надзвичайно малими значеннями даного параметра для прецизійних конденсаторів, значним впливом паразитних елементів вимірювальних схем, нестабільністю параметрів з'єднувальних кабелів, впливом частоти, температури та інших факторів на результат вимірювання. Крім того, важливим аспектом є побудова коректного модельного рівняння вимірювання, яке дає змогу адекватно врахувати всі джерела похибок та сформувати обґрунтований бюджет невизначеності відповідно до рекомендацій міжнародних документів з оцінювання невизначеності вимірювань [7, 8, 10].

У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення науково обґрунтованого підходу до калібрування прецизійних мір ємності за тангенсом кута втрат на Державному первинному еталоні одиниць електричної ємності та фактора втрат, який би відповідав вимогам стандарту ISO/IEC 17025 [10], забезпечував метрологічну простежуваність результатів вимірювань та давав можливість отримувати результати з підтвердженою невизначеністю.

Результати такої роботи мають важливе значення для розвитку національної метрологічної інфраструктури, розширення калібрувальних і вимірювальних можливостей України та забезпечення міжнародного визнання результатів вимірювань у галузі вимірювань електромагнітних величин.

2. Технічні засоби для калібрування. В 2001 році ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» розроблено і введено в експлуатацію Державний первинний еталон одиниць електричної ємності і фактора втрат ДЕТУ 08-06-01. Зовнішній вигляд еталону зображено на рис. 4.

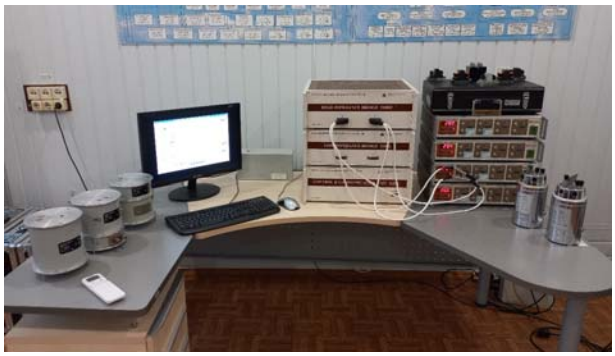


Рис. 4

Державний первинний еталон одиниць електричної ємності і фактора втрат складається з комплексу засобів вимірювальної техніки:

– комплекту еталонних мір електричної ємності Andeen-Hagerling типу AH11A 10 pF (4 од.);

– комплекту еталонних мір електричної ємності Andeen-Hagerling типу AH11A 100 pF (4 од.);

– комплекту еталонних перехідних мір електричної ємності (від 1 pF до 1,0 μF);

– комплекту еталонних мір активного електричного опору (від 0,1 Ω до 1,0 MΩ);

– універсального еталонного компаратора комплексного опору 5100;

– допоміжного обладнання.

Діапазон значень електричної ємності – від $1\cdot10^{-3}$ pF до 100 μF, фактора втрат – від $1\cdot10^{-7}$ до 1,0.

Термостатовані еталонні міри електричної ємності Andeen-Hagerling типу AH11A утворюють дві групові міри 10 pF і 100 pF.

Еталон забезпечує відтворення одиниць вимірювань на частоті 1000,0 Hz.

Еталонний компаратор зі складу ДЕТУ 08-06-01 дає змогу здійснювати передавання розмірів одиниць параметрів імпедансу в діапазоні значень, що визначається набором мір активного опору та електричної ємності [11].

Державний первинний еталон одиниць електричної ємності та фактора втрат забезпечує відтворення, зберігання та передавання одиниці тангенса кута втрат прецизійним мірам ємності, які використовуються як робочі та вторинні еталони у калібрувальних і випробувальних лабораторіях.

3. Забезпечення метрологічної простежуваності вимірювань електричної ємності та фактора втрат. Еталонні міри зі складу групової безперервно досліджуються понад 25 років. Завдяки калібруванням, проведеним в національних метрологічних інститутах провідних країн світу (BIPM, Франція; PTB, Німеччина; NIST, США; NPL, Великобританія, GUM, Польща та CMI, Чехія), а також дослідженням, проведеним в ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», значення електричної ємності еталонних мір AH11A відомо з розширеною невизначеністю $U\left(\hat{C}_{AH}\right)= 1{,}0\cdot10^{-7}$ pF, а значення їх тангенсу кута втрат з розширеною невизначеністю $U\left(\widehat{\mathrm{tg}\delta}\right)= 6{,}0\cdot10^{-7}$ за коефіцієнта охоплення $k=2$ та рівні довіри p, який приблизно дорівнює 0,95. Постійні дослідження зазначених мір дають змогу оцінити та врахувати дрейф їх основних характеристик.

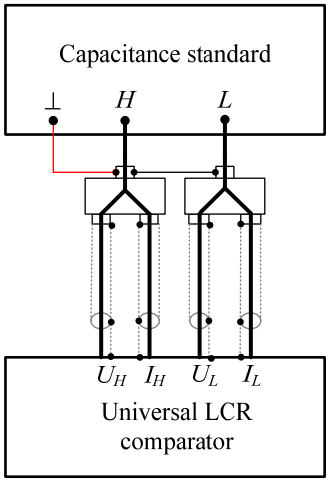


Рис. 5

Результати міжнародних звірень, до яких залучався Державний первинний еталон [12], підтверджують калібрувальні та вимірювальні можливості (CMC) ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», які містяться в Додатку С Взаємної угоди (MRA) Міжнародного комітету мір і ваг [13]. У відповідності до угоди MRA дійсність звітів про результати вимірювань взаємно визнається всіма інститутами-учасниками щодо параметрів вимірювання, діапазонів і невизначеностей вимірювань, зазначених у KCDB – базі даних ключових звірень BIPM [14].

4. Калібруванні мір електричної ємності за тангенсом кута втрат. До початку вимірювань необхідно здійснити автокалібрування універсального еталонного компаратора комплексного опору 5100 згідно інструкції користувача. Після автокалібрування компаратора здійснюється його калібруван-

ня за зовнішньою еталонною мірою ємності, для чого збирається схема вимірювань, зображена на рис. 5.

До компаратора за допомогою штатних кабелів підключається еталонна міра ємності, яка має сертифікат калібрування із зазначенням її електричної ємності і тангенсу кута втрат. Контакти "*H*" і "*L*" міри ємності необхідно підключити відповідно до контактів "*H*" і "*L*" компаратора, а корпус компаратора, корпус міри ємності і екрани з'єднувальних кабелів необхідно підключити до контуру заземлення.

Значення електричної ємності і тангенсу кута втрат із сертифіката калібрування еталонної міри ємності (із урахуванням дрейфу від останнього калібрування) заносяться у відповідні вікна на екрані компаратора. Включається режим "Калібрування за зовнішньою мірою", під час якого калібруються внутрішні міри компаратора.

Задля визначення похибки калібрування, що вноситься компаратором (похибка компарування), виконується серія із 10 вимірювань ємності і тангенсу кута втрат тієї самої еталонної міри.

Значення ємності і тангенсу кута втрат вимірюються і виводяться на монітор компаратора одночасно. Числове значення похибки компарування $\Delta tg\delta_{CE}$ розраховується як різниця між дійсним і середнім виміряним значенням тангенсу кута втрат.

Стандартна невизначеність похибки компарування визначається з урахуванням стандартного відхилення серії із 10 вимірювань згідно [7, 8]

$$u_A(\widehat{\Delta \mathrm{tg}\delta_{CE}}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(\widehat{\mathrm{tg}\delta_{Ci}} - \overline{\widehat{\mathrm{tg}\delta_{C}}}\right)^2}\ ,\ n=10\,;$$

а також невизначеності похибки квантування показів компаратора

$$u_B(\widehat{\Delta tg\delta_{QC}}) = \frac{a}{2\sqrt{3}}\,,$$

де a – крок дискретизації показів компаратора [7, 8].

Для калібруванні мір електричної ємності за тангенсом кута втрат необхідно зібрати схему вимірювань, аналогічну зображеній на рис. 5. Вимірювання ємності і тангенсу кута втрат здійснюються компаратором під час подавання на міру ємності діючої напруги 100,0 V частотою 1000,0 Hz. Виконується серія із 10 вимірювань ємності і тангенсу кута втрат еталонної міри, що калібрується.

5. Побудова математичної моделі вимірювань тангенсу кута втрат та оцінювання його невизначеності вимірювань Під час калібрування міри електричної ємності тангенс кута втрат $tg\delta_X$ міри, що калібрується, отримується з математичної моделі вимірювань

$$tg\delta_X = tg\delta_S + \Delta tg\delta_C + \Delta tg\delta_{QC} + \Delta tg\delta_{TX} + \Delta tg\delta_{SC} + \Delta tg\delta_{CE} + \Delta tg\delta_{S\gamma}\,,$$

де $tg\delta_S$ – тангенс кута втрат еталонної міри, значення якого беруть із сертифікату її калібрування; $\Delta tg\delta_C$ – різниця між величиною, що виміряна компаратором і величиною тангенсу кута втрат, що відтвоює еталонна міра, числове значення якої дорівнює різниці між середнім значенням показів компаратора під час вимірювання тангенсу кута втрат міри, що калібрується, та значенням еталонної міри, вказаним в сертифікаті калібрування (з урахуванням дрейфу)

$$\widehat{\Delta tg\delta_C} = \overline{\widehat{tg\delta_C}} - \left(\widehat{tg\delta_S} + \widehat{\Delta tg\delta_{S\gamma}}\right);$$

її стандартна невизначеність типу А згідно [7, 8] розраховується як стандартне відхилення показів компаратора серії із 10 вимірювань

$$u_A(\widehat{\Delta tg\delta_C}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(\widehat{\mathrm{tg}\delta_{Ci}} - \overline{\widehat{\mathrm{tg}\delta_{C}}}\right)^2}\ ,\ n=10\,,$$

$\Delta tg\delta_{QC}$ – поправка на похибку квантування компаратора, числове значення якої дорівнює нулю, а стандартна невизначеність обчислюється аналогічно наведеній вище $u_B(\widehat{\Delta tg\delta_{QC}})$; $\Delta tg\delta_{TX}$ – поправка на температурну залежністю міри, що калібрується, числове значення якої дорівнює нулю, якщо міра застосовується на тій самій температурі, на якій здійснюється калібрування, а невизначеність цього параметра визначається як

$$u\left(\Delta tg\delta_{TX}\right) = \frac{\hat{K}_{tg\delta_{TX}}\left(t_{\max} - t_{\min}\right)}{2\sqrt{3}}\,,$$

де $K_{tg\delta_{TX}}$ – температурний коефіцієнт тангенсу кута втрат, значення якого отримується із специфікації виробника на конденсатор, що калібрується [15], або потребує додаткового дослідження [5, 6]; $t_{\min}$, $t_{\max}$ – границі температурного діапазону, в якому калібрується конденсатор; $\Delta tg\delta_{SC}$ – поправка на чутливість компаратора, числове значення якої отримується із специфікації виробника на компаратор; $\Delta tg\delta_{CE}$ – поправка на похибку компарування (див. вище); $\Delta tg\delta_{S\gamma}$ – поправка, що зумовлена дрейфом значення тангенсу кута втрат еталонної міри з моменту останнього калібрування. Задля оцінки дрейфу і його невизначеності необхідно розрахувати прогнозоване значення еталонної міри на дату калібрування згідно [16–20].

Температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат $K_{tg\delta_{TX}}$ є важливою метрологічною характеристикою прецизійних capacitance standards, яка визначає зміну значення $tg\delta$ під впливом температури. Фізична природа цієї залежності зумовлена комплексом процесів, що відбуваються в діелектрику конденсатора, зокрема температурною залежністю електропровідності та механізмів поляризації. З підвищенням температури, як правило, зростає провідність діелектричного матеріалу, що призводить до збільшення активної складової струму і, відповідно, до зростання тангенса кута втрат. Крім того, температурні зміни впливають на релаксаційні процеси в діелектрику, що може викликати нелінійну залежність $tg\delta$ від температури, особливо у випадку складних або багатокомпонентних матеріалів.

Суттєвий вплив на температурний коефіцієнт $K_{tg\delta_{TX}}$ мають також конструктивні особливості конденсатора та умови проведення вимірювань. До таких факторів належать паразитні втрати у струмопровідних елементах, контактні опори, поверхневі витоки та якість ізоляційних матеріалів. Температурні зміни можуть спричиняти варіації цих параметрів, що додатково впливає на результати вимірювання тангенса кута втрат. Важливу роль відіграє також частота вимірювального сигналу, оскільки співвідношення між провідними та діелектричними втратами змінюється залежно від частоти, що, у свою чергу, визначає характер температурної залежності $tg\delta$. У прецизійних вимірюваннях необхідно враховувати і вплив зовнішніх факторів, зокрема вологості та температурних градієнтів, які можуть викликати додаткові нестабільності та похибки.

Для еталонних конденсаторів, у яких значення $tg\delta$ є надзвичайно малими (на рівні 10^{-8}–10^{-5}), навіть незначні температурні зміни можуть призводити до відчутних відносних відхилень результатів вимірювань. У зв'язку з цим забезпечення стабільного температурного режиму (зокрема шляхом термостатування) є необхідною умовою проведення високоточних калібрувань. Температурний коефіцієнт тангенса кута втрат $K_{tg\delta_{TX}}$ повинен враховуватися у модельному рівнянні вимірювання у вигляді відповідної поправки, а також включатися до бюджету невизначеності як один із суттєвих внесків. Це забезпечує підвищення достовірності результатів калібрування та їх метрологічну простежуваність до міжнародного або національного еталона.

В таблиці наведено приклад розрахунку бюджету невизначеності ($tg\delta_X$), який застосовується під час калібрування прецизійних конденсаторів за фактором втрат.

Стандартна невизначеність тангенсу кута втрат еталонної міри $u\left(tg\delta_S\right)$ отримується із її сертифікату калібрування.

Сумарна стандартна навизначеність дійсного значення тангенсу кута втрат отримується через взяті з таблиці внески невизначеності $u_i\left(\widehat{tg\delta_X}\right)$ за формулою

$$u\left(\widehat{tg\delta_X}\right)=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}u_i^2\left(\widehat{tg\delta_X}\right)}\,.$$

Розширена невизначеність в табл.1 отримується з виразу

$$U=k\cdot u\left(tg\delta_X\right)=2\cdot 3{,}92\text{E}-06=7{,}83\text{E}-06$$

за коефіцієнта охоплення $k=2$ та $p=0{,}95$.

Забезпечення стабільності частоти 1000 Hz, на якій проводяться вимірювання, дає змогу не враховувати частотну залежність еталонної міри та міри, що калібрується.

Величина X_i	Оцінка x_i	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Розподіл	Тип оцінювання стандартної невизначеності	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок у невизначеність $u_i(y)$
$tg\delta_S$	1,06E-06	1,50E-06	норм.	B	1	1,50E-06
$\Delta tg\delta_C$	-2,48E-07	2,91E-06	норм.	A	1	2,91E-06
$\Delta tg\delta_{QC}$	0	5,78E-07	прямокут.	B	1	5,78E-07
$\Delta tg\delta_{TX}$	0	1,80E-07	норм.	B	1	1,80E-07
$\Delta tg\delta_{SC}$	0	1,05E-07	норм.	B	1	1,05E-07
$\Delta tg\delta_{CE}$	-1,30E-06	1,80E-06	норм.	B	1	1,80E-06
$\Delta tg\delta_{S\gamma}$	1,20E-07	1,00E-06	норм.	B	1	1,00E-06
$tg\delta_X$	9,32E-07	Сумарна стандартна невизначеність			u_c	3,92E-06
		Ефективні ступені свободи			n_{eff}	>200, $k = 2$
		Розширена невизначеність (p » 95 %)			U	7,83E-06

Висновки.

1. У ході проведених досліджень запропоновано та науково обґрунтовано методичний підхід до калібрування прецизійних еталонних конденсаторів за тангенсом кута діелектричних втрат на Державному первинному еталоні одиниць електричної ємності та фактора втрат. Запропонований підхід базується на використанні еталонного компаратора комплексного опору, математичної моделі вимірювань та формуванні обґрунтованого бюджету невизначеності, що дає змогу врахувати основні фактори, які впливають на результат визначення тангенса кута втрат.

2. Розроблено модельне рівняння вимірювання, яке описує процес визначення тангенса кута втрат під час калібрування мір ємності та враховує внески від параметрів еталонної міри, похибок компарування, нестабільності температурних умов, похибок квантування компаратора та дрейфу характеристик еталонних мір. На основі цієї моделі сформовано бюджет невизначеності, що дає можливість кількісно оцінити внесок окремих джерел невизначеності у сумарну невизначеність результату вимірювання.

3. Показано, що вимірювання тангенса кута втрат для прецизійних конденсаторів є складною метрологічною задачею через надзвичайно малі значення цього параметра та значний вплив паразитних втрат у вимірювальному тракті. Отримані результати демонструють можливість визначення тангенса кута втрат із підтвердженою невизначеністю, що відповідає сучасним вимогам до високоточних електричних вимірювань.

4. Запропонований підхід забезпечує метрологічну простежуваність результатів вимірювань параметрів конденсаторів до Державного первинного еталона одиниць електричної ємності та фактора втрат та може бути використана під час калібрування робочих і вторинних еталонів ємності, що застосовуються у калібрувальних і випробувальних лабораторіях.

5. Результати дослідження мають важливе значення для розвитку національної метрологічної інфраструктури України, оскільки забезпечують удосконалення методичного забезпечення калібрування засобів вимірювальної техніки у сфері вимірювань електромагнітних величин. Реалізація запропонованого підходу сприятиме забезпеченню міжнародної простежуваності результатів вимірювань та їх взаємному визнанню в межах Угоди про взаємне визнання національних еталонів, сертифікатів калібрування та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами (CIPM MRA) [13].

6. Практичне впровадження результатів роботи сприятиме підвищенню достовірності вимірювань параметрів конденсаторів та інших складових електричних систем, що використовуються у вимірювальній техніці, енергетиці, телекомунікаційних системах та засобах контролю електричної ізоляції. Таким чином, результати дослідження мають важливе державне значення, оскільки сприяють забезпе-

ченню надійності функціонування енергетичної інфраструктури, розвитку високотехнологічних галузей промисловості та інтеграції України до міжнародного економічного простору.

1. IEC 62631-2-1:2018. Dielectric and resistive properties of solid insulating materials. Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor – AC methods. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2018. 45 p.
2. IEC 60384-1: Fixed capacitors for use in electronic equipment. Part 1: Generic specification. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2021. 80 p.
3. Shoma Tanaka, Tadahiro Horinouchi, Shoichi Abe, Yasumasa Matsuno, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Nobuhiro Harada. Inactivation property of microorganisms in water irradiated by atmospheric-pressure plasma using dielectric barrier discharge. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2013. Vol. 8, Issue 2. Pp. 105-110. DOI: https://doi.org/10.1002/tee.21828.
4. Velychko O., Shevkun S., Gordiyenko T., Dobroliubova M. Metrological Traceability of Impedance Parameter Measurements in Ukraine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No. 4/9 (94). Pp. 43-49. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139689.
5. IEC 60250: Recommended methods for the determination of the permittivity and dielectric dissipation factor of electrical insulating materials. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2018. 56 p.
6. Simmon E. D., FitzPatrick G., Petersons O. Calibration of Dissipation Factor Standards. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1999. Vol. 48. No. 2. Pp. 450-452. DOI: https://doi.org/10.1109/19.769624.
7. JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. 124 p.
8. EA-4/02 M:2013. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Paris, European Cooperation for Accreditation, 2013. 76 p.
9. BIPM. The International System of Units (SI), 9th ed. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures, 2019. 218 p.
10. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2017. 32 p.
11. Velychko O., Surdu M., Shevkun S., Dobroliubova M.. Transfer of the Units Size by the Range of Values with Using the State Primary Standard of the Units of Electrical Capacitance and Dissipation Factor. Proc. 27th International Scientific Symposium on *Metrology and Metrology Assurance* 2017. Bulgaria, 8-12 September 2017. Pp. 40-43.
12. Velychko. O., Shevkun. S. Evaluation results of comparison of the national standards of capacitance unit. Proc. XXI IMEKO World Congress on *Measurement in Research and Industry*. Czech Republic. 30 August – 4 September 2015. 5 p. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2362.7926
13. BIPM. Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA): Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates Issued by National Metrology Institutes, 1999, 46 p.
14. KCDB – the BIPM key comparison database. URL: https://www.bipm.org/kcdb/ (Accessed: 14.02.2026).
15. Andeen-Hagerling Inc. AH11A Capacitance Standard. Instruction Manual and Technical Notes. URL: https://www.andeen-hagerling.com/ (Accessed 14.02.2026).
16. Shevkun S, Dobroliubova M., Statsenko O., Sevkun M. Calculation of the capacitance predicted value of a precision capacitor and evaluation of its uncertainty by extrapolating the results of previous calibrations using the weighted linear regression method. *Measurements infrastructure*. 2026. No. 11. Pp. 1-9. DOI: https://doi.org/10.33955/v11(2026)-090
17. White D. R. Drift of standards and transfer devices. Metrologia. 2005. Vol. 42 (1). Pp. 30-36.
18. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to Linear Regression Analysis. 5th ed., John Wiley & Sons, 2012. 672 p.
19. JCGM GUM-6:2020. Guide to the expression of uncertainty in measurement - Part 6: Developing and using measurement models. 2020.
20. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with minor corrections). Joint Committee for Guides in Metrology. 2008

UNCERTAINTY EVALUATION OF THE DISSIPATION FACTOR AT CALIBRATION OF PRECISION CAPACITANCE STANDARDS

S.M. Shevkun[1], V.P. Kvasnikov[2], M.V. Dobroliubova[3], O.V. Statsenko[3], M.S. Shevkun[4]
[1] State Enterprise "All-Ukrainian State Scientific-and-Production Centre for Standardization, Metrology, Certification and Protection of Consumer",
4, Metrologichna str., Kyiv, 03143, Ukraine.
[2] State University «Kyiv Aviation Institute»,
1, Liubomyra Huzara ave, Kyiv, 03058, Ukraine.
[3] National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine.
[4] PEOPLe: Projects to Empower & Organize the Psychiatrically Labeled, Inc.,
22 N Oakwood Terrace, New Paltz, NY, 12561, USA.

E-mail: shevkun@ukrcsm.kiev.ua, volodymyr.kvasnikov@npp.kai.edu.ua, m.v.dobroliubova@gmail.com, o.statsenko@kpi.ua, mshevkun.dev@gmail.com.

This article examines the methodological and metrological aspects of calibrating precision capacitance standards using the dissipation factor (loss factor) at the State Primary Standard of units of electrical capacitance and loss factor. The relevance of the study stems from the need to ensure high accuracy in measuring capacitance and loss parameters in capacitors, which are widely used in measurement technology, power engineering, telecommunications systems, and other fields, particularly in electrical insulation testing equipment. The dissipation factor is an important characteristic of dielectric materials and capacitors, which determines the level of energy losses in the dielectric and significantly affects the accuracy of complex impedance measurements, as well as the results of electrical insulation system diagnostics.
This paper presents a block diagram of the measurement setup used to calibrate precision capacitance standards based on the dissipation factor and describes its operating principle. A mathematical model of the measurements has been developed that accounts for the main components affecting the result of determining the dissipation factor, in particular the parameters of the measuring bridge, errors in the quadrature signal, the influence of frequency and supply voltage instability, as well as parasitic losses in the elements of the measuring path. A model equation for the measurement is presented, and a detailed interpretation of the physical meaning of its components is provided.
Particular attention is paid to the analysis of sources of measurement uncertainty and the development of an uncertainty budget for the calibration procedure. An example is given of the calculation of the total standard and expanded uncertainty of the calibration result for a precision volume measure based on the dissipation factor. The results obtained can be used to develop calibration methods for capacitance standards based on the dissipation factor and to ensure the metrological traceability of measurements of capacitor parameters to the national standard. References 20, figures 5, table 1.

***Keywords*:** uncertainty budget, capacitance standard, measurement model, national standard, precision capacitor, measurement traceability, dissipation factor, loss factor.

Надійшла 19.03.2026
Прийнята 13.05.2026