

ВІДТВОРЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПЕДАНСУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ У СИСТЕМАХ ОДИНИЦЬ SI I NEW SI

Ю.Ф. Павленко, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків

П.І. Неєжмаков, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, перший заступник генерального директора ННЦ "Інститут метрології" з наукової роботи, м. Харків

Н.М. Маслова, старший науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків

В.В. Анікін, провідний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків



Ю.Ф. Павленко



П.І. Неєжмаков



Н.М. Маслова



В.В. Анікін

Розглянуто еволюцію методів відтворення параметрів електричних кіл – від розрахункових до квантових. Для ілюстрації деяких положень використано матеріали досліджень Фізико-технічного інституту Німеччини.

The evolution of methods of reproduction parameters of electric circuits, from designed parameters to quantum ones, was considered. The research materials of Federal Physical and Technical Institute of Germany were used to illustrate certain provisions.

Вступ

Приблизно до 80-х рр. минулого століття параметри електричних кіл – активний опір R , електрична ємність C та індуктивність L – визначалися розрахунковими методами через геометричні розміри відповідних пристроїв: резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності.

Відомо, що параметри імпедансу електричних кіл – активний опір R , ємнісний опір $Z_C = 1 / j\omega C$ та індуктивний опір $Z_L = j\omega L$ – можуть бути пов'язані між собою за допомогою змінного струму з відомою частотою і так званого квадратурного моста, за яким встановлюється рівність імпедансів, що знаходяться в різних фазах або в протифазах:

$$R = \frac{1}{\omega C} = \omega L. \quad (1)$$

Таким чином, знаючи один із параметрів R , L , C і частоту f , можна визначити інші параметри за виразами

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{R}{\omega}; \quad (2)$$

$$= \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{\omega}. \quad (3)$$

У недалекому минулому, до відкриття квантового ефекту Холла (КЕХ), кожний із цих імпедансів по чергово слугував опорною точкою для відтворення інших. Спочатку це був розрахунковий резистор R_p , потім – розрахункова індуктивність L_p , нарешті, – розрахункова ємність C_p [1].

1. Розрахунковий конденсатор

Саме за допомогою розрахункового конденсатора, який мав спеціальну симетричну конструкцію з кількома циліндричними електродами, було досягнуто найменшої невизначеності відтворення одиниці імпедансу. У 1956 р. австралійськими вченими Томпсоном і Лампардом був розроблений розрахунковий конденсатор (РК), який забезпечив невизначеність 10^{-7} [2, 3]. Спочатку лише Національний метрологічний інститут (НМІ) Австралії мав розрахунковий конденсатор, а НМІ інших країн калібрували в ньому свої еталони опору кожні кілька років. Пізніше було виготовлено

кілька РК у різних країнах, а невизначеність було зменшено до $5 \cdot 10^{-8}$, але їх розповсюдженню завжала значна складність технології їх виготовлення.

Докладно основи методики відтворення ємності за допомогою розрахункового конденсатора викладено в [1, 2], де показано, що повна “перехресна” ємність ідеального розрахункового конденсатора з довжиною циліндра (електродів) l дорівнює

$$C = \bar{C}l = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l, \quad (4)$$

а її приріст

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l. \quad (5)$$

Із формул (4), (5) видно, що середнє значення питомої ємності \bar{C} такого конденсатора є постійним. Відхилення від симетрії приводить до поправочних членів другого порядку малості, настільки ж мало впливають на \bar{C} параметри температурного поля. Важливою позитивною властивістю розрахункового конденсатора Томпсона – Лампарда є те, що для визначення ємності потрібне тільки вимірювання довжини l , яке можна виконати з високою точністю. Його недолік – мала ємність (близько 1 пФ на 50 см довжини), що вимагає побудови спеціальних масштабних перетворювачів для передачі розміру одиниці в область більших ємностей.

Існує багато варіантів конструкції конденсатора з перехресними ємностями, але оптимальною виявилася конфігурація із чотирьох паралельних стрижнів, симетрично розташованих у заземленому круговому циліндрі (рис. 1), – конденсатор Клотье [4].

Вимірювання довжини електродів l здійснюється за допомогою інтерферометра, елементи якого встановлюються разом із розрахунковим конденсатором в одному вакуумному блоці.

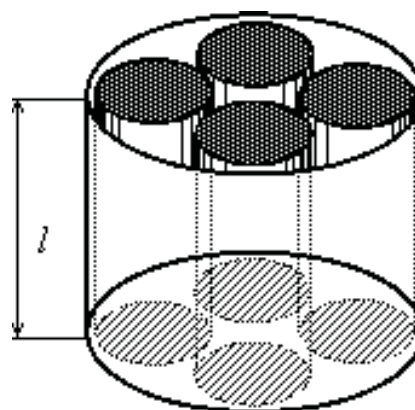


Рис. 1. Конструкція розрахункового конденсатора Клотье

Джерелом домінуючої похибки розрахунку еталонної ємності є наявність крайових ефектів, що приводять до утворення ємностей між торцевими поверхнями кожної пари циліндрів $C_{кр}$ (рис. 2а). З урахуванням крайового ефекту

$$C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l_0 + C_{кр}.$$

Для підвищення точності розрахунку необхідно виключити вплив цих ємностей. Із цією метою визначають не саму середню ємність C , а її приріст ΔC (рис. 2а). Для цього в простір між електродами вводиться заземлений екран циліндричної форми (рис. 2).

При просуванні такого екрана уздовж осі крайові ефекти залишаються незмінними, що дозволяє обчислити різницю ємностей у залежності від відстані $\Delta l = l_1 - l_2$, на яку переміщується екран. Тоді

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l_1 + C_{кр} - \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l_2 - C_{кр} = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l,$$

де Δl – зміна ефективної довжини електродів.

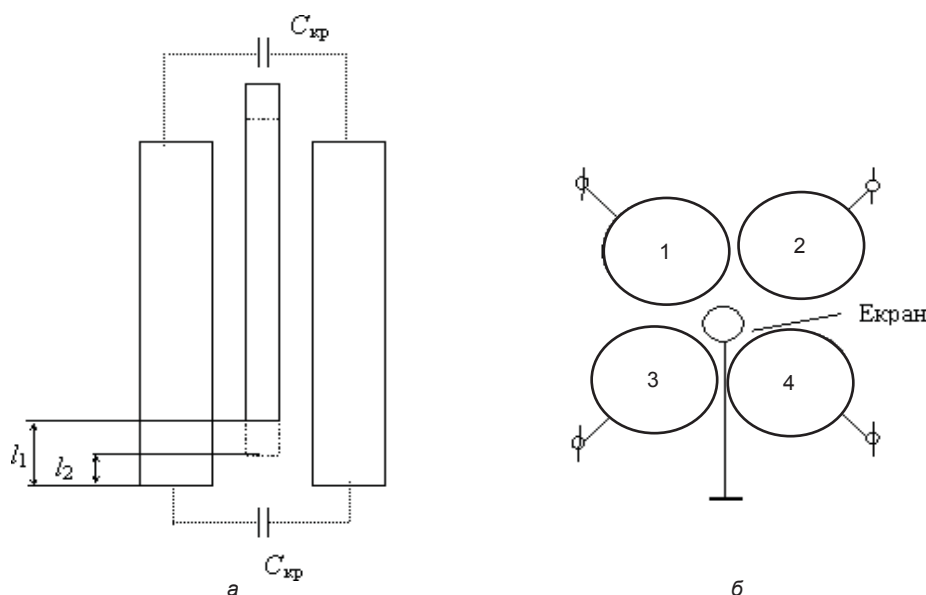


Рис. 2. Розрахунковий конденсатор із заземленим екраном

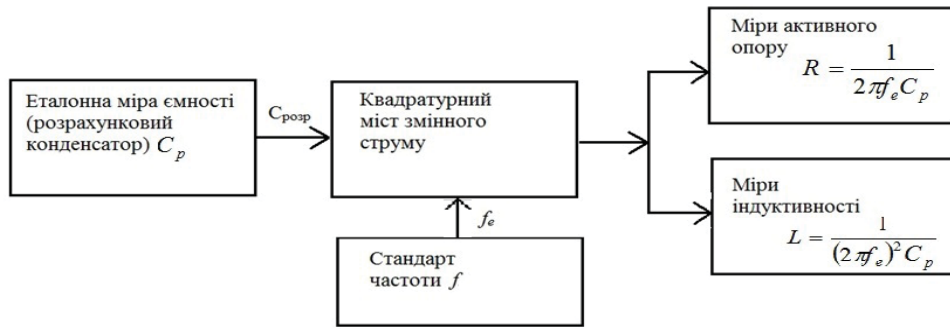


Рис. 3. Схема калібрування мір активного опору та індуктивності за РК

Відстань Δl , на яку переміщується екран униз, вимірюється інтерферометром.

2. Відтворення одиниць активного опору та індуктивності за допомогою розрахункового конденсатора

До відкриття Клітцингом квантового ефекту Холла розрахунковий конденсатор був найбільш точним вихідним пристроєм для відтворення не тільки ємності, але й активного опору та індуктивності за рівняннями (1)–(3). Спрощену схему реалізації цих рівнянь наведено на рис. 3.

Але на практиці встановити ці рівності в необхідних значеннях R , C і L виявилось далеко не просто. Для цього потрібні мости-компаратори двох типів: масштабуючі і квадратурні, – а також стандарт частоти НЧ-діапазону, прецизійні міри R , L , C різних кратностей тощо. Оскільки в Україні робота з РК не проводилася, наведемо розроблене у Фізико-технічному інституті Німеччини (РТВ) вимірювальне коло

від розрахункового конденсатора 1 пФ (усі відомі конструкції РК здатні відтворювати ємність не більше 1 пФ) до опору 1 Ом (рис. 4), з якого видно, скільки кроків і зусиль необхідно для цього витратити [5]. Коло виконано із пар еталонних пристроїв, послідовно приєднаних до квадратурного моста із масштабуючим коефіцієнтом 10:1, а також кріогенного компаратора струму (cryogenic comparator current – CCC) – моста з точним коефіцієнтом перетворення струму.

3. Квантовий ефект Холла

Квантовий ефект Холла було відкрито у 1980 р. німецьким вченим Клаусом фон Клітцингом [6]. Вчений зафіксував, що на відміну від класичного ефекту Холла в спеціальних структурах типу метал-діелектрик-напівпровідник (рис. 5) при температурі рідкого гелію (4,2 К) й у сильному магнітному полі (від 6 до 12 Тл) виникає “двовимірний електронний газ”, при цьому електричний опір квантується – приймає строго фіксовані (дискретні) значення відповідно до виразу

$$R_x = \frac{h}{ne^2}, \tag{6}$$

де h – стала Планка; e – елементарний заряд; $h/e^2 = R_K$ – стала Клітцинга; $R_K = 25812,807$ Ом; $n = 1, 2, 3, \dots$ – ціле число (номер сходинки).

На залежності R_x від щільності електронів, яка при класичному ефекті Холла має монотонний характер (рис. 6, крива a), виникають серії плато, тобто має місце квантування опору (крива b) [6, 7].

Наведемо також залежності холлівського R_x і поздовжнього опору R_{xx} від магнітної індукції B , звідки видно, що при квантуванні поздовжній опір падає до нуля, що є одним із критеріїв існування КЕХ (рис. 7).

Прилад, що реалізує квантовий ефект Холла, став майже ідеальним природним еталоном електричного опору, а КЕХ, після численних експериментів і випробувань, у 1988 р. був рекомендований Міжнародним комітетом мір та ваг (СІРМ) для первинного відтворення відповідної одиниці – ома.

Із практичних міркувань номер плато (сходинки) вибирається парним (2 або 4), тоді холлівський опір відповідно дорівнює $(R_x)_{n=2} = h/(2e)^2 = 12906,4035$ Ом, або $(R_x)_{n=4} = 6453,20175$ Ом.

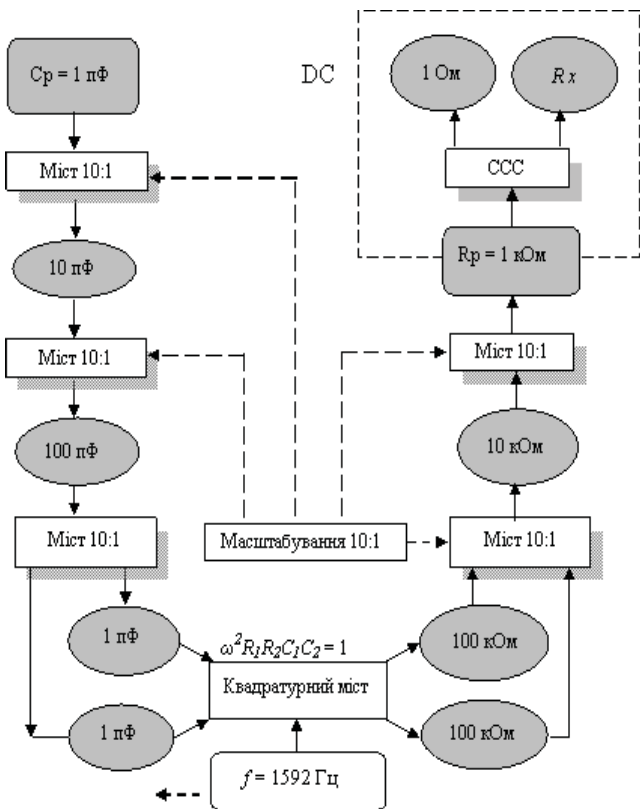


Рис. 4. Вимірювальне коло від РК до еталонної міри опору 1 Ом

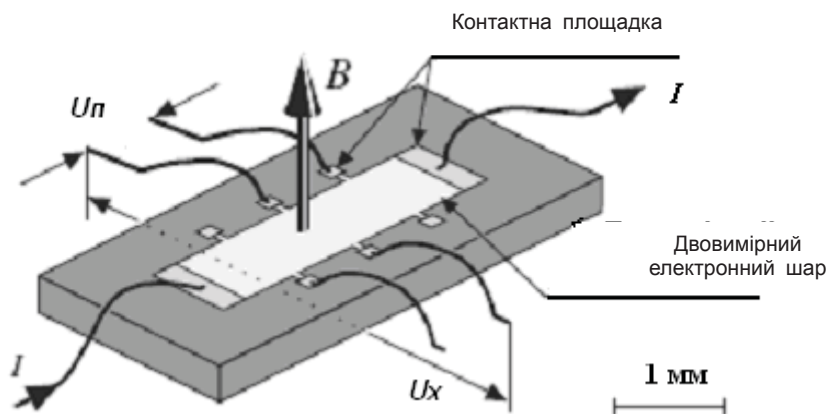


Рис. 5. Структура метал-діелектрик-надпровідник

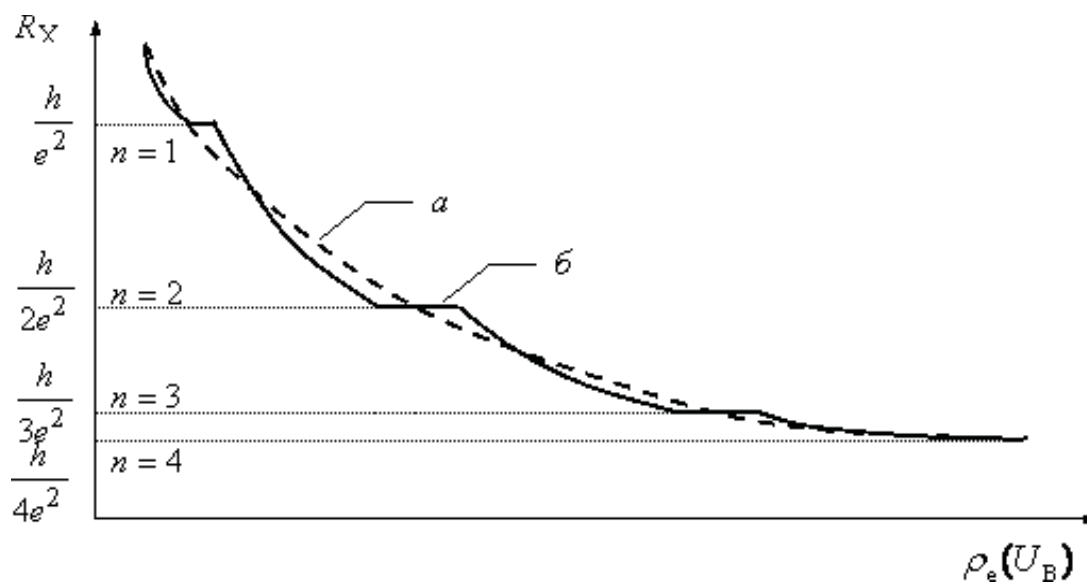


Рис. 6. Залежність холлівського опору від щільності електронів

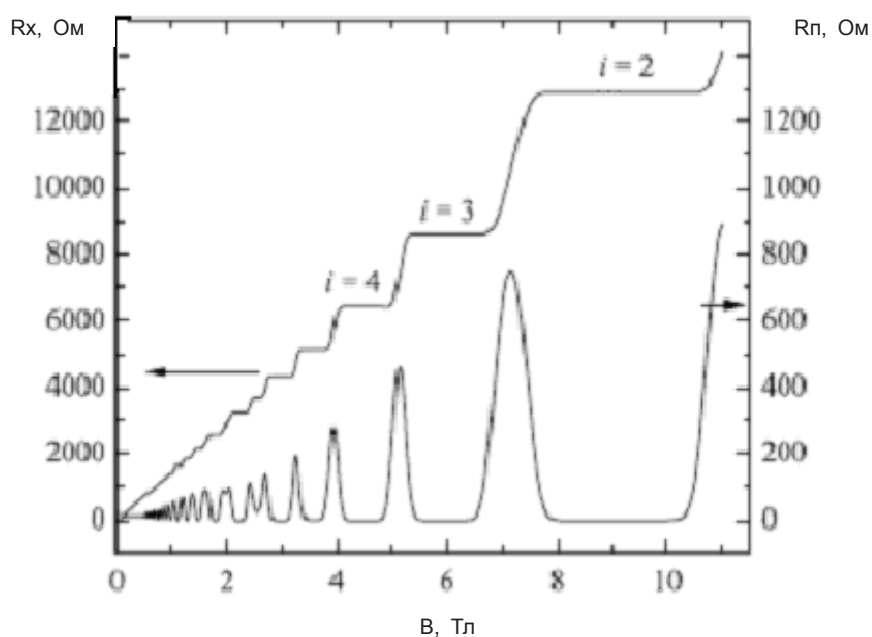


Рис. 7. Залежності холлівського і поздовжнього опорів від магнітної індукції B



Рис. 8. Схема калібрування мір ємності та індуктивності за КЕХ

4. Відтворення ємності та індуктивності за допомогою холлівської міри опору на постійному струмі

Спрощену схему відтворення (калібрування) одиниць ємності та індуктивності з використанням КЕХ показано на рис. 8.

Наведемо цей шлях відтворення одиниць також на прикладі РТВ.

Розроблене в РТВ [5] вимірювальне коло від міри холлівського опору 12,9 кОм до ємності 10 пФ наведено на рис. 9 (прилад на КЕХ працює на постійному струмі).

Використання цієї схеми у порівнянні зі схемою на РК дозволило зменшити похибку відтворення параметрів імпедансу приблизно на порядок, а головне, побудувати систему відтворення одиниць не на артефакті, який через свою природу не може бути абсолютно стабільним, а на квантовому ефекті і фундаментальних сталих.

Однак вимірювальна схема все ще залишалася досить складною. Зокрема, вона потребує прецизійної міри опору – резистора $R_p = 1,29$ кОм із нормованою частотною залежністю [5].

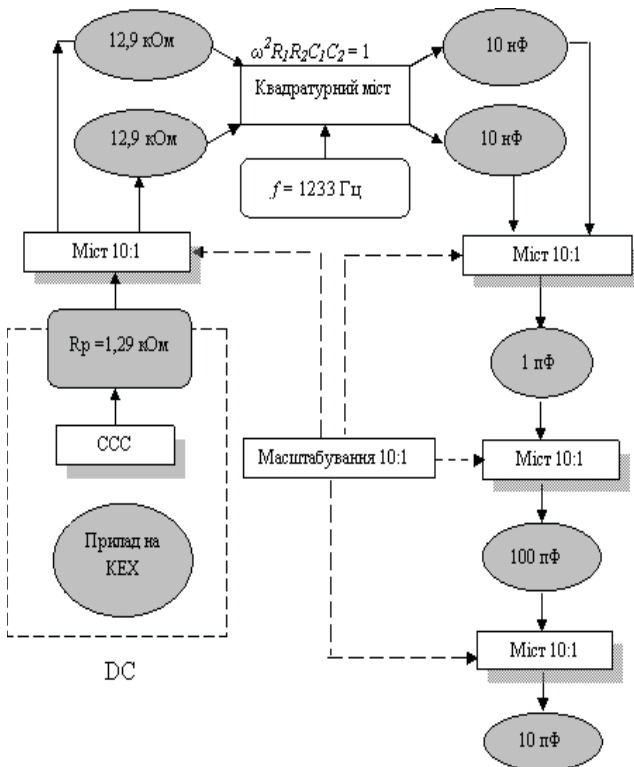


Рис. 9. Вимірювальне коло від міри на КЕХ до еталонного конденсатора 10 пФ

5. Використання квантового ефекту Холла на змінному струмі

Успіхи у використанні КЕХ для відтворення одиниці електричного опору, а також розробка “маршруту” (електричного кола) для калібрування еталонної електричної ємності сприяли подальшим дослідженням у цій сфері.

У 1992 р. Дж. Мельхером з колегами (РТВ) було запропоновано реалізувати КЕХ на змінному струмі з частотою, необхідною для калібрування ємності (та індуктивності) [8]. Логіка цієї пропозиції зрозуміла: “внутрішня” частота приладів на КЕХ визначається циклотронною частотою обертання електронів навколо магнітних силових ліній у двовимірному електронному газі холлівської структури, що становить сотні гігагерц. Це означає, що у приладі на КЕХ не повинно бути ніякої частотної залежності в діапазоні звукових частот, оскільки для нього струм на таких частотах є фактично квазіпостійним струмом.

НМІ почали проводити роботи з використання КЕХ на змінному струмі, але швидко з’явилися перші розчарування: було виявлено, що плато характеристики КЕХ на змінному струмі дещо викривлені або “зашумлені”, не такі плоскі, як при постійному струмі, а також дещо зміщені за опором у порівнянні з КЕХ на постійному струмі. Було також виявлено, що і викривлення, і зміщення збільшуються пропорційно частоті і становлять кілька одиниць 10^{-7} на 1 кГц. Ці ефекти були віднесені на рахунок ємності у квантовому пристрої для реалізації КЕХ. Через це більшість НМІ припинили свої роботи в цьому напрямку, деякі досягли зменшення невизначеності (похибки) до 10^{-8} на кГц, яка була прийнятною для практичних цілей, але не для справжнього квантового еталона [5].

Так продовжувалося близько 10 років, поки В. Р. Кіббл, який співпрацював із РТВ, не знайшов методичних недоліків у вимірюванні імпедансу і не запропонував відповідної техніки екранування [9]. Завдяки цьому невизначеності знизилися до $1 \cdot 10^{-9}$ на кГц, що вже не поступається точності, досягнутої за допомогою КЕХ на постійному струмі [5].

Розроблене в РТВ вимірювальне коло показано на рис. 10. Воно набагато простіше від маршруту на постійному струмі і, тим паче, від маршруту з розрахунковим конденсатором. Суттєвою перевагою

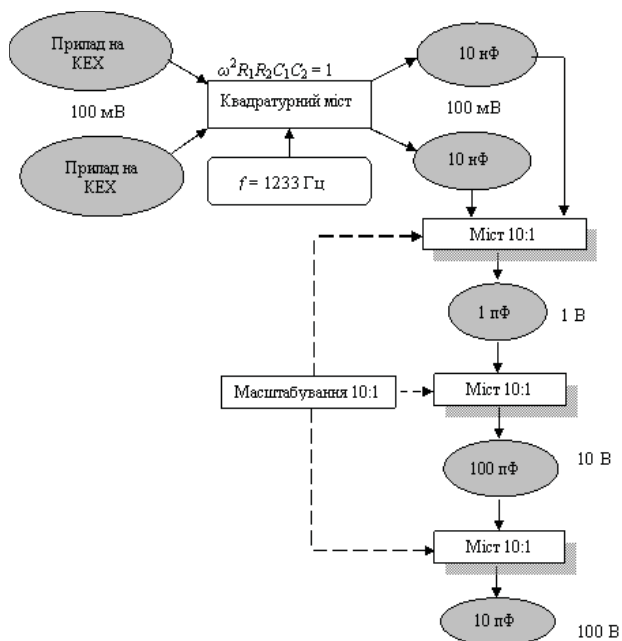


Рис. 10. Вимірювальне коло від холлівської міри опору на змінному струмі до ємності 10 пФ

використання КЕХ на змінному струмі, у порівнянні з постійним струмом, є відсутність потреби в атестованому резисторі 1,29 кОм.

Перевага використання КЕХ на змінному струмі полягає також у можливості калібрування мір ємності різних номінальних значень на різних частотах.

Завдяки низькому тепловому шуму криогенного приладу на КЕХ коло вимірювання на змінному струмі може бути виконано таким чином, що кожний із двох еталонів ємності, які використовуються у вимірюваннях, працює при тій самій напрузі (рис. 10) [5, 10]. Це усуває необхідність трудомісткого визначення та коригування залежності еталонів ємності від напруги, що необхідно для проходження маршруту. І навпаки, залежний від напруги прилад на КЕХ змінного струму може бути використаний з метою простого визначення впливу напруги на еталони ємності.

Нарешті, реалізація одиниці ємності від КЕХ на змінному струмі є важливою для експерименту, відомого як “випробування квантового метрологічного трикутника” [11, 12]. Криогенний конденсатор із ємністю C , відкаліброваною відносно сталої фон Клітцинга R_K , заряджається за допомогою “насоса одноелектронного тунелювання” (Single Electron Tunneling – SET) до відомої кількості електронів (заряду $Q = Nq$), і отримана напруга U на конденсаторі вимірюється відносно сталої Джозефсона K_J . Враховуючи рівність $Q = CU$, можна проводити випробування сумісності квантового трикутника через відношення між фундаментальними сталими $R_K = h/e^2$, $q = e$ та $K_J = 2e/h$.

Таким чином, використання КЕХ у порівнянні з розрахунковим конденсатором дозволяє підняти точність і надійність відтворення одиниць імпедансу (завдяки використанню стабільного фізичного ефекту замість артефакту), а використання КЕХ на змінному струмі – спростити процедуру і технологію від-

творення одиниць у порівнянні з КЕХ на постійному струмі, а також одержати нові функційні можливості.

6. Відтворення параметрів імпедансу та еволюція системи SI

Як відомо, в існуючій SI фактично використовується точне значення магнітної сталої $\mu_0 \equiv 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, яке зафіксовано у визначенні ампера. Точне значення μ_0 (точніше – діелектричної сталої ϵ_0) використовується в розрахунковому конденсаторі (4). Прийняття в 1988 р. Рекомендацій 1 та 2 СІРМ щодо використання з 1 січня 1990 р. макроскопічних квантових ефектів Джозефсона і Холла для відтворення вольта і ома відповідно, а також установлення точних (конвенційних) значень сталих Джозефсона $K_{J-90} = 483597,9$ ГГц/В і Клітцинга $R_{K-90} = 25812,807$ Ом фактично означало введення нової системи одиниць в електриці, яка одержала назву практичної. У цій системі μ_0 і ϵ_0 перестали бути сталими і повинні визначатися експериментально.

24-та Генеральна конференція з мір та ваг (CGPM) (2011 р.) схвалила, а 25-та CGPM (2014 р.) підтвердила введення (орієнтовно з 2018 р.) нової SI (New SI), в якій змінюються визначення низки основних одиниць, у тому числі ампера. Значення конвенційних сталих K_{J-90} і R_{K-90} відміняються, а точного значення набувають стала Планка h і елементарний заряд e (табл. 1). R_K буде визначатися з виразу (6). Деталі імплементації доволі абстрактного визначення ампера в New SI в практичну реалізацію надано в проекті документа, відомого як “mise en pratique”, який доступний на сайті Міжнародного бюро мір та ваг з 2009 р. Найбільші зміни в ньому стосуються нових значень сталих Джозефсона – K_J та Клітцинга – R_K , які були отримані з останніх експериментів.

Значення CODATA (Комітету з чисельних даних для науки і техніки) для R_K отримано значною мірою з експериментів, що визначають сталу тонкої структури α , з такого співвідношення:

$$h/e^2 = \mu_0 c / 2\alpha,$$

де числові значення магнітної сталої μ_0 і швидкості світла c визначено в існуючій SI.

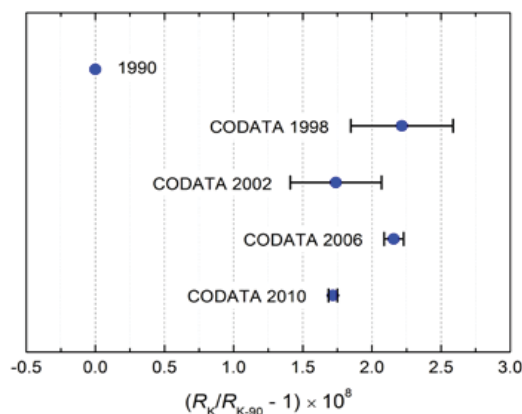


Рис. 11. Значення сталої Клітцинга після установлення конвенційного значення у 1990 р.

Таблиця 1

Система одиниць	Опорний метод	Використовувана стала	Мінімальна стандартна невизначеність
Класична SI	Розрахунковий конденсатор	$\mu_0 = \text{const}$ ($\epsilon_0 = \text{const}$)	$5 \cdot 10^{-8}$
Практична	Квантовий ефект Холла	$R_{K-90} = \text{const}$ $\mu_0 \neq \text{const}$	$1 \cdot 10^{-9}$
New SI	Квантовий ефект Холла	$h = \text{const}$ $e = \text{const}$ $\mu_0 \neq \text{const}$ $R_{K-90} \neq R_K$	$1 \cdot 10^{-9}$

На рис. 11 наведено значення R_K , отримані в останні роки [13]. Відносне зміщення R_K CODATA 2010 від значення R_{K-90} становить близько $17 \cdot 10^{-9}$ при невизначеності менше ніж $1 \cdot 10^{-9}$. Усі останні чотири значення CODATA для R_K дуже добре узгоджуються на рівні $1 \cdot 10^{-8}$. Ситуація для K_j не настільки очевидна, як для R_K . Хоча й існує невелике зменшення невизначеності, але її значення ще не досягло рівня 10^{-8} .

Є декілька практичних аспектів реалізації змін, викликаних введенням New SI. Для користувачів квантових еталонів впровадження New SI потребують оновлення значень R_K і K_j у програмному забезпеченні. І виробники повинні спланувати ці роботи для вже поставлених систем, щоб на момент введення New SI уникнути розбіжностей у результатах.

7. Стан в Україні

В Україні роботи зі створення національної еталонної бази почалися у 1993 р., коли час розрахункового конденсатора як вихідного еталона імпедансу вже минув. Тому із самого початку в електричній метрології було обрано курс на квантові еталони на ефектах Джозефсона (вольта) і Холла (ома).

Наприкінці 90-х рр. минулого століття в ННЦ “Інститут метрології” було створено квантовий ета-

лон вольта, а також першу чергу первинного еталона одиниці активного опору – ома, структурну схему якого наведено на рис. 12 [14].

Як видно із цієї схеми, еталон у своєму складі містить усі необхідні компоненти, за винятком міри на квантовому ефекті Холла.

До складу еталона входять:

- апаратура зберігання одиниці опору, що складається із груп мір опору 1 та 100 Ом і перехідних мір 11×10 Ом;
- апаратура передачі 1, яка дозволяє одержувати від іншого еталона холлівський розмір ома, тобто відтворений на основі квантового ефекту Холла;
- апаратура передачі 2, за допомогою якої можна одержати опір 1 Ом, відтворений на основі розрахункового конденсатора;
- міст-компаратор;
- набір перехідних мір для передачі розміру одиниці опору робочому еталону в діапазоні від 10^{-3} до 10^9 Ом;
- система забезпечення функціонування еталона, до якої входять спеціалізоване термостатоване приміщення, засоби термостатування апаратури еталона, живлення та автоматики.

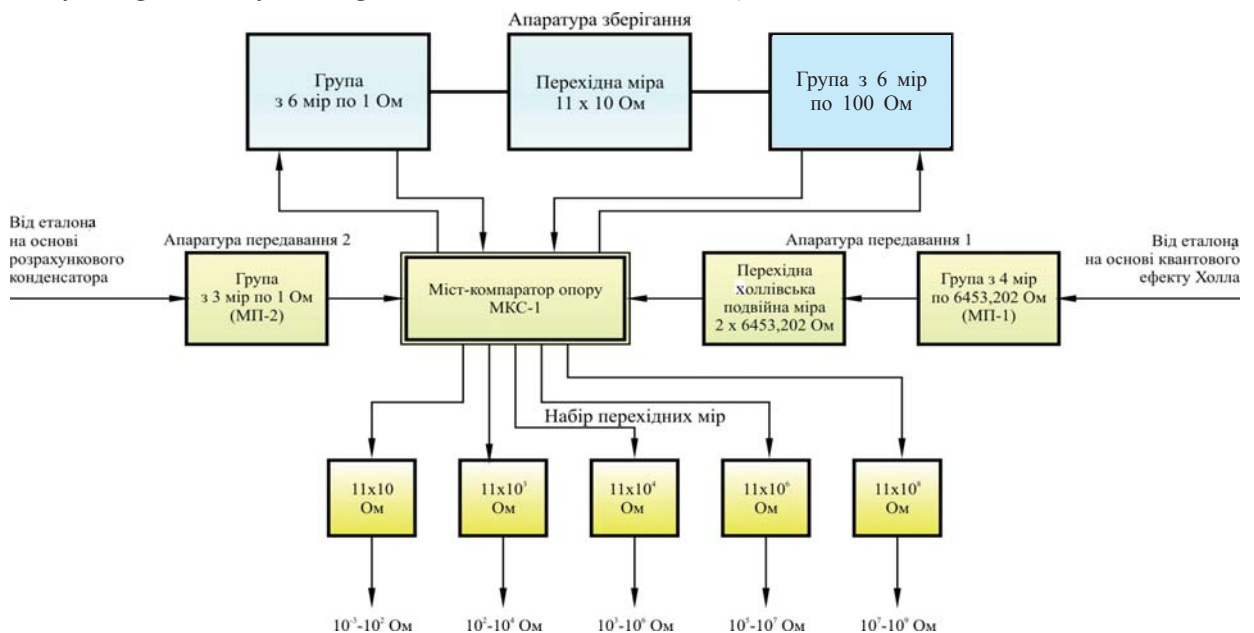


Рис. 12. Структурна схема первинного еталона одиниці електричного опору

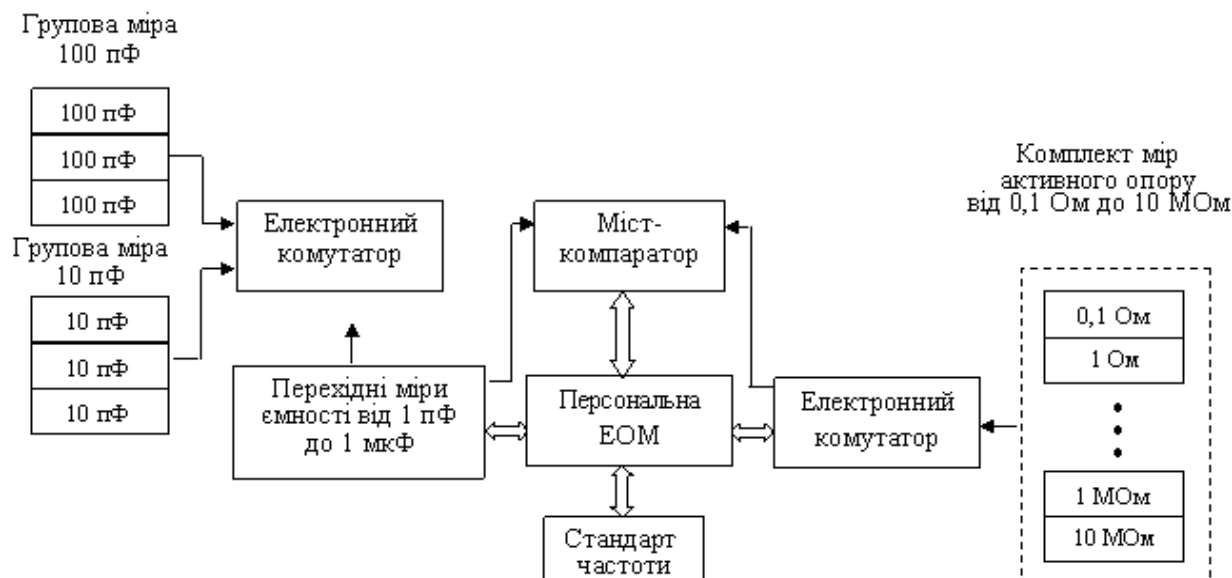


Рис. 13. Структурна схема первинного еталона електричної ємності України

Особливостями еталона є наявність двох різномінальних груп зберігання одиниці 1 та 100 Ом, що дозволяє мінімізувати систематичну похибку, а також пристроїв, які дають можливість безпосереднього зв'язку з еталоном на квантовому ефекті Холла та розрахунковим конденсатором (останній хоч і втратив своє значення вихідної міри імпедансу, але залишається важливим дослідницьким засобом).

Одним із “тонких” метрологічних питань експлуатації цього еталона є поєднання розмірів одиниць опору, одержаних від розрахункового конденсатора (її носієм є група 1 Ом апаратури зберігання) і від еталона на ефекті Холла (переданою групі 100 Ом апаратури зберігання). Поєднання пропонується проводити шляхом зіставлення відносних похибок середніх арифметичних значень опору обох вищезазначених груп зберігання. В ідеальному випадку середні значення кожної групи, наприклад, стоомної, одержані різними шляхами (від розрахункового конденсатора і квантового ефекту Холла), повинні збігатися. Але в дійсності завжди має місце розбіжність, значення якої і є критерієм точності передачі. Якщо розбіжність не перевищує значення НСП (тобто знаходиться у межах $1 \cdot 10^{-7}$), передачу можна вважати задовільною. Але для урахування поправки, яку можна одержати завдяки еталонній різномінальній групі зберігання, слід спиратися на середнє зважене серед названих двох середніх відносних значень:

$$\tilde{\delta}_{зв} = \frac{p_1 \tilde{\delta}_1 + p_2 \tilde{\delta}_2}{p_1 + p_2},$$

де p_1 і p_2 – вагові коефіцієнти середніх $\tilde{\delta}_1$ і $\tilde{\delta}_2$.

Для оцінки вагових коефіцієнтів необхідно враховувати кількість етапів передачі від однієї до другої групи зберігання.

Еталон має такі метрологічні характеристики:

Діапазон відтворення одиниць опору, Ом	$10^{-3} \dots 10^9$
Невиключена систематична похибка (НСП)	$1 \cdot 10^{-7}$
Середньоквадратичне відхилення (СКВ) результату вимірювань, не більше	$3 \cdot 10^{-8}$
Стандартна невизначеність	$2 \cdot 10^{-7}$

Підкреслимо, що хоча цей еталон поки не відтворює розмір ома на основі квантового ефекту Холла, але перший крок до цього зроблено: завдяки тому, що до складу еталона введено описану вище апаратуру передачі 1, еталон здатний одержувати і зберігати холлівський розмір ома. Вже відбулися три процедури одержання розміру ома від еталона на квантовому ефекті Холла (РТВ, Німеччина).

На початку цього століття в ДП “Укрметртест-стандарт” було створено первинні еталони одиниць ємності та індуктивності. Структурну схему першого наведено на рис. 13, еталон індуктивності близький до нього за принципом побудови [15, 16]. В еталонах використовуються сучасні прецизійні міри R , L , C ,

Таблиця 2

Характеристика	Еталон електричної ємності	Еталон електричної індуктивності
Діапазон відтворення одиниць	Від $1 \cdot 10^{-3}$ пФ до 100 мкФ	Від $1 \cdot 10^{-6}$ до 10 Гн
НСП	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$
СКВ	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Стандартна невизначеність	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$

масштабуючі та квадратурні мости-компаратори, інші необхідні пристрої. Метрологічні характеристики цих еталонів наведено в табл. 2.

Зазначимо, що показники точності цих еталонів визначаються вихідними мірами активного опору і можуть бути поліпшені шляхом калібрування їх за первинним еталоном активного опору із введеною мірою на КЕХ. Роботи з удосконалення державного первинного еталона одиниці електричного опору ДЕТУ 08-02-98 у цій частині заплановано на 2015–2016 рр.

Висновки

Методологія відтворення параметрів електричних кіл за останні 60 років пройшла значну еволюцію – від розрахункових до квантових, а точність підвищилася приблизно на два порядки. Відповідно вихідними мірами цих параметрів по чергово були розрахункові резистори, котушки індуктивності, конденсатори і, нарешті, прилади на квантовому ефекті Холла.

Сьогодні оптимальним шляхом є відтворення активного опору на основі КЕХ і калібрування еталонних мір ємності та індуктивності на змінному струмі НЧ-діапазону за допомогою квадратурних мостів-компараторів. Використання КЕХ як первинного методу відтворення параметрів електричних кіл повністю відповідає ідеології побудови систем одиниць New SI.

Первинні еталони параметрів електричних кіл України мають у своєму складі сучасну апаратуру зберігання розмірів одиниць, їх масштабування і компарування, але не мають вихідної міри на КЕХ. Робота з її створення, а також підготовка апаратури еталона активного опору до роботи з мірою на КЕХ проводяться в ННЦ “Інститут метрології”. Із закінченням цих робіт Україна матиме сучасний еталонний комплекс у цьому підвиді електричних вимірювань.

Автори висловлюють щире подяку доктору технічних наук, професору М.М. Сурду за надання цінних матеріалів і корисні дискусії.

Список літератури

1. *Кротков И.Н.* Точные измерения электрических емкости и индуктивности / И.Н. Кротков. – М.: Изд-во стандартов, 1966. – 272 с.
2. *Thompson A.M.* A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance / A.M. Thompson, D.G. Lampard // *Nature*. – 1956. – V. 177, № 4515. – P. 888.
3. *Lampard D.G.* // *Proc. IEEE Monograph 216M*. – 1957. – 271. – 104 с.
4. *Clothier W.* // *Metrologia*. – 1965. – № 2.
5. *Schurr J.* The ac quantum Hall resistance as an electrical impedance standard and its role in the SI / J. Schurr, F. Ahlers, B.P. Kibble // *Meas. Sci. Technol.* – 2012. – 23. – 124009 (20 pp).
6. *Klitzing K.* New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance / K. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // *Phys. Rev. Lett.* – 1980. – V. 45, № 6. – P. 494–497.
7. *Кибис О.В.* Квантовый эффект Холла / О.В. Кибис // *Соросовский образовательный журнал*. – 1999. – № 9. – С. 89–93.
8. *Melcher J.* Comparison of precision ac and dc measurements with the quantized Hall resistance / J. Melcher, P. Warnecke, R. Hanke // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1993. – 42. – 292–4.
9. *Kibble B.P.* A novel double-shielding technique for ac quantum Hall measurement / B.P. Kibble, J. Schurr // *Metrologia*. – 2008. – 45. – L25–7.
10. *Schurr J.* Realizing the farad from two ac quantum Hall resistances / J. Schurr, V. Burkel, B.P. Kibble // *Metrologia*. – 2009. – 46. – 619–28.
11. Progress towards the electron counting capacitance standard at PTB / H. Scherer, S.V. Lotkhov, G.D. Willenberg, B. Camarota // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 2009. – 58. – P. 997–1002.
12. Реформа SI і її вплив на систему відтворення електричних одиниць / П.І. Неєжмаков, Ю.Ф. Павленко, Н.М. Маслова, В.В. Анікін // *Український метрологічний журнал*. – 2013. – № 1. – С. 3–10.
13. Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values / N. Fletcher, G. Rietveld, J. Olthoff [et al.] // *NCSLI Measure J. Meas. Sci.* – 2014. – Vol. 9, № 3. – P. 30–35.
14. Державний первинний еталон одиниці електричного опору / Ю.Ф. Павленко, Г.С. Сидоренко, В.В. Анікін [та ін.] // *Український метрологічний журнал*. – 1998. – Вип. 4. – С. 26–28.
15. *Ахмадов А.А.* Перспективы совершенствования системы метрологического обеспечения средств измерений параметров электрических цепей / А.А. Ахмадов, М.Н. Сурду // *Там само*. – 1996. – Вип. 4. – С. 23.
16. Державний еталон одиниць електричної ємності і тангенса кута втрат / О.А. Ахмадов, С.О. Ахмадов, Р.А. Харжевський, М.М. Сурду // *Там само*. – 2007. – № 3. – С. 24–30.