

УДК 389.14

С.М. Шевкун¹, М.М. Сурду², О.М. Величко¹, М.В. Добролюбова³

¹ Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»), Київ

² Науково-виробничий центр «Енергоімпульс», Київ

³ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ ПЕРЕДАВАННЯ І СПОСОБІВ ВІДТВОРЕННЯ ОДИНИЦЬ ПАРАМЕТРІВ ІМПЕДАНСУ

Розроблено метод пошуку точок передавання одиниці фізичної величини між різнорідними параметрами імпедансу, знайдено сукупності таких точок для досягнення найвищих метрологічних характеристик, запропоновано методики мінімізації похибки передавання розмірів одиниць параметрів імпедансу з опором на різнорідні еталони шляхом вибору оптимальної схеми передавання.

Ключові слова: еталон, параметр імпедансу, компарування, оптимізація.

Постановка задачі

Існуюча на теперішній час еталонна база національних метрологічних інститутів, яка створювалася протягом багатьох десятиріч, передбачає наявність державного еталона кожної окремої одиниці імпедансу: електричної ємності, індуктивності, активного опору. В останній час у провідних країнах світу створюється і застосовується нове покоління вихідних еталонів параметрів імпедансу, які опираються на фундаментальні константи [1].

Проте створення та утримання зазначених еталонів є настільки коштовним, що більша частина країн, що розвиваються, не можуть цього реалізувати. Особливо гостро стоїть зазначена проблема в умовах обмеженого бюджетного фінансування на утримання національної еталонної бази, або у разі госпрозрахункового утримання національних метрологічних інститутів, коли витрати на еталони не покриваються за рахунок надходжень від виконання метрологічних робіт з використанням цих еталонів. З іншого боку, конкурентоспроможність метрологічних послуг безпосередньо залежить від реалізованої точності вимірювань, тобто, чим менше невизначеність вимірювань, що досягається під час проведення калібрувань, тим більше споживачів, в тому числі і іноземних, будуть зацікавлені в отриманні одиниці фізичної величини саме в цій лабораторії.

В той же час поява сучасних універсальних компараторів дозволяє для забезпечення вимірювань параметрів імпедансу використовувати будь-який із зазначених еталонів [2]. Але в цьому разі процес відтворення і передавання розміру будь-якого параметра імпедансу суттєво ускладнюється і перестає бути однозначним. При цьому точність відтворення і передавання одиниці параметра імпедансу суттєво залежить від конфігурації множини можливих шляхів реалізації зазначеного процесу.

Розв'язання вказаного протиріччя пропонується здійснити шляхом пошуку та визначення оптимальних шляхів передавання одиниць параметрів імпедансу за критерієм «найвища точність – обґрунтована вартість».

Оптимізація способів відтворення і схем передавання одиниць параметрів імпедансу надасть можливість суттєво підвищити точність вимірювань цих величин, підвищити експлуатаційні та конструктивні показники еталонної бази параметрів імпедансу, конкурентоспроможність метрологічних робіт, що виконуються в інтересах вітчизняних та іноземних замовників, забезпечити економію дефіцитних фінансових ресурсів на калібрування складових еталонів за кордоном, а також більш повно використовувати технічні можливості національної еталонної бази.

Метою статті є висвітлення методичних основ для передавання одиниць параметрів імпедансу від міжнародних еталонів на фундаментальних фізичних константах до державних первинних еталонів при використанні у якості еталона передавання однієї будь-якої еталонної міри ємності, індуктивності або активного опору за умови збереження точності вимірювань на рівні провідних країн світу.

Основна частина

Для досягнення найвищої точності передавання одиниць параметрів імпедансу від різнорідних еталонів необхідно вирішити наступні завдання:

– розробити метод встановлення точок передавання одиниці фізичної величини між різнорідними параметрами імпедансу і знайти їх сукупність, яка забезпечить зв'язок між параметрами імпедансу

при передаванні одиниці вимірювань з найвищою точністю;

– розробити підходи щодо мінімізації похибки при реалізації схеми передавання розміру одиниці параметру імпедансу з опорою на різномірні еталони.

При вирішенні задачі оптимізації необхідно враховувати, що сучасні технічні засоби дозволяють проводити пряме (з опорою на еталон частоти) порівняння однорідних або неоднорідних параметрів еталонів.

Розглянемо поздовжнє (при однорідних параметрах) передавання, де функції пристрою порівняння f і λ мають вигляд, наведений нижче

$$Z_X = \alpha Z_A + \beta Z_B; \quad (1)$$

$$Z_X = (\alpha + j\beta)Z_0. \quad (2)$$

Комплексний опір Z_X описується рівнянням:

$$Z_X = A_X + jB_X, \quad (3)$$

де A_X та B_X – активна і реактивна абсолютні складові імпедансу.

Тоді, якщо використовується функція (1):

$$A_X = \alpha A_0 \left(1 + \frac{\beta B_0 \operatorname{tg} \delta_0}{\alpha A_0}\right);$$

$$B_X = \beta B_0 \left(1 + \frac{\alpha A_0 \operatorname{tg} \phi_0}{\beta B_0}\right);$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{A_0}{B_0} \left(1 + \frac{\beta B_0 \operatorname{tg} \delta_0}{\alpha A_0}\right) \times \left(1 + \frac{\alpha A_0 \operatorname{tg} \phi_0}{\beta B_0}\right)^{-1} \quad (4)$$

А якщо використовується функція (2):

- при використанні еталона опору:

$$A_X = \alpha R_0 \left(1 + \frac{\beta \operatorname{tg} \phi_0}{\alpha}\right);$$

$$B_X = \beta R_0 \left(1 + \frac{\alpha \operatorname{tg} \phi_0}{\beta}\right); \quad (5)$$

- при використанні еталона ємності:

$$A_X = \frac{\beta}{\omega C_0} \left(1 + \frac{\alpha \operatorname{tg} \delta_0}{\beta}\right);$$

$$B_X = \frac{\alpha}{\omega C_0} \left(1 + \frac{\beta \operatorname{tg} \delta_0}{\alpha}\right). \quad (6)$$

Формули (5, 6) демонструють, що для визначення будь-яких параметрів імпедансу необхідно і достатньо мати еталони активного або реактивного параметрів, які одночасно є і еталонами нульового значення тангенса кута втрат або тангенса фазового кута.

Аналогічний аналіз було проведено для поперечних передавань (порівняння різномірних параметрів).

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки про структуру еталонної бази в галузі вимірювань параметрів імпедансу:

1. Мінімальна кількість еталонів для відтворення і вимірювання параметрів імпедансу, дорівнює двом: еталон одного з параметрів імпедансу і еталон частоти.

2. Еталон параметра імпедансу, що використовується, повинен бути одночасно як еталоном основного параметра, так і еталоном допоміжного параметра (нульового або достатньо малого значення тангенса кута втрат або тангенса фазового кута).

3. Мінімальна система еталонів дозволяє атестувати зразкові міри імпедансу будь-якого характеру за двома параметрами.

4. Для передавання (або відтворення) розміру одиниці параметра імпедансу необхідно мати комплекс засобів, що дозволяють порівнювати між собою імпеданс з однорідними або квадратурними параметрами.

Наведений опис структури еталонної бази недостатній для створення оптимальної метрологічної схеми та прийняття рішення про вимоги до апаратури, що забезпечує її функціонування. На рис. 1 наведено динамічні діапазони, в яких розміщені імпеданси еталонів окремих параметрів комплексного опору та імпеданси відповідних еталонних мір.

Як видно з цього рисунку, діапазони, в яких розміщені імпеданси еталонних мір окремих параметрів, так само як і імпеданси самих еталонів цих фізичних величин, істотно відрізняються. Ця обставина призвела до того, що апаратура для передавання розміру різних одиниць окремих параметрів імпедансу також істотно відрізняється і залежить від виду вимірюваних параметрів та їх діапазонів. Спроби використовувати існуючу апаратуру або створити нову апаратуру для передавання розмірів одиниць параметрів імпедансу за існуючими сьогодні вимогами неминує призводити до нагромадження коштовного прецизійного обладнання.

Передавання розміру одиниць параметрів імпедансу в діапазоні значень проводиться за допомогою порівняння або рівнономіальних еталонних мір, або за допомогою децимального компарування.

Технічною основою для реалізації оптимізованих схем передавання і способів відтворення одиниць параметрів імпедансу є комплекс квадратурного та синфазно-протифазного компараторів імпедансів, що розміщені в одному корпусі [3].

Для кожної частоти необхідно оптимізувати процес квадратурного передавання і знайти значення мір, при яких можливе рівноімпедансне передавання. При цьому бажано використовувати найбільш розповсюджені міри з номіналів, кратних 1, 2, ..., 9, 10. Для окремих випадків раціональне створення мір спеціальних номіналів.

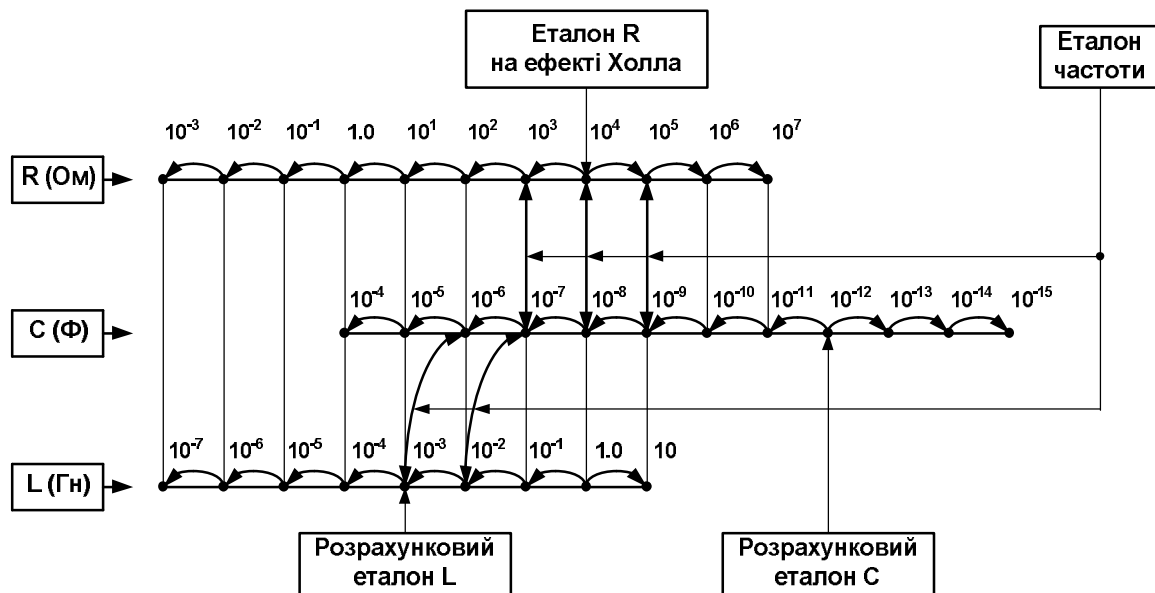


Рис. 1. Діаграма передавання розмірів одиниць параметрів комплексного опору

Рис. 2 ілюструє результати обчислень для частоти 1 кГц при порівнянні мір ємності і опору. На частоті 1 кГц знайдено три точки, де можна проводити рівноімпедансне компарування. Ці точки відповідають передачі $R \leftrightarrow C$ від мір опору з номіналом, кратним 0,2, до міри ємності з номіналом, кратним 0,8; від міри опору з номіналом, кратним 0,4 до міри ємності, з номіналом, також кратним 0,4; від мір опору з номіналом, кратним 0,8, до міри ємності з номіналом, кратним 0,2. В усіх названих точках відносне відхилення від номіналу становить 0,00528. Ця величина достатньо велика. При такому відхиленні компаратор не забезпечить максимальну точність вимірювання (максимальна точність компаратора досягається при відхиленнях $\delta \leq \pm 0,02\%$).

Для усунення цієї проблеми після передавання розміру на будь-яку з основних мір опору або ємності, що мають номінальне значення, його можна скоригувати, додавши додаткову міру, відносне значення якої дорівнює 0,00528 від значення основної міри. При цьому, якщо додаткова міра виміряна з похибкою хоча б 0,01%, загальна похибка за рахунок цього фактора не перевищує $5 \cdot 10^{-7}$. На інтервалі відхилень в 0,5% від номіналу частотним ходом сучасних мір ємності і опору можна знехтувати. Тому для усунення виниклої проблеми можна змінити робочу частоту компаратора на зазначені відхилення. Тоді похибка передавання буде мінімальною.

Рис. 3 ілюструє результати проведених обчислень для частоти 1 кГц при порівнянні мір опору і індуктивності. Як показує цей рисунок, існує дві точки, де можна проводити рівноімпедансне компа-

рування мір індуктивності і опору. Ці точки відповідають передаванню $R \leftrightarrow L$ від мір опору з номіналом, кратним 0,2 до міри індуктивності з номіналом, кратним 0,3, і від міри опору з номіналом, кратним 0,5 до міри індуктивності з номіналом, кратним 0,8. Але в першій з названих точок відносне відхилення від номіналу становить 0,05752, а в другій – 0,00531. Обидві ці величини достатньо великі. Для усунення цієї проблеми після передавання розміру на основну міру опору, що має номінальне значення, її можна змінити, додавши додаткову міру, відносне значення якої дорівнює 0,05752 і 0,00531 від значення основної міри відповідно.

При цьому, якщо додаткова міра виміряна з похибкою хоча б 0,02%, загальна похибка вимірювання не перевищить 10^{-6} .

Раніше розглянуті поперечні передавання виконувались за допомогою квадратурного моста. Розглянемо поперечне передавання виду $C \leftrightarrow L$ за допомогою синфазно-протифазного компаратора. Результати розрахунків за наведеною методикою для частоти 1 кГц наведено на рис. 4.

Існує три точки, де можна проводити рівноімпедансне компарування мір ємності і індуктивності. Ці точки відповідають передаванню $C \leftrightarrow L$ від мір ємності з номіналом, кратним 0,8 до міри індуктивності з номіналом, кратним 0,3; від міри ємності з номіналом, кратним 0,6 до міри індуктивності з номіналом, кратним 0,4; від міри ємності з номіналом, кратним 0,5 до міри індуктивності з номіналом, кратним 0,5. В першій і другій з названих точок відносне відхилення від номінального відношення плечей компаратора становить 0,052518, в третій – 0,01304. Всі ці величини великі.

Першу і другу точки з відносним відхиленням 0,052518 можна взагалі виключити з розгляду. На додаток необхідно врахувати, що в обігу є міри індуктивності з номіналами, кратними 1, 2, 3, 5, але

немає мір індуктивності з номіналом, кратним 8. І на відміну від мір ємності або опору спроби скласти міру, кратну 8 із мір меншого номіналу, призводять до значних похибок.

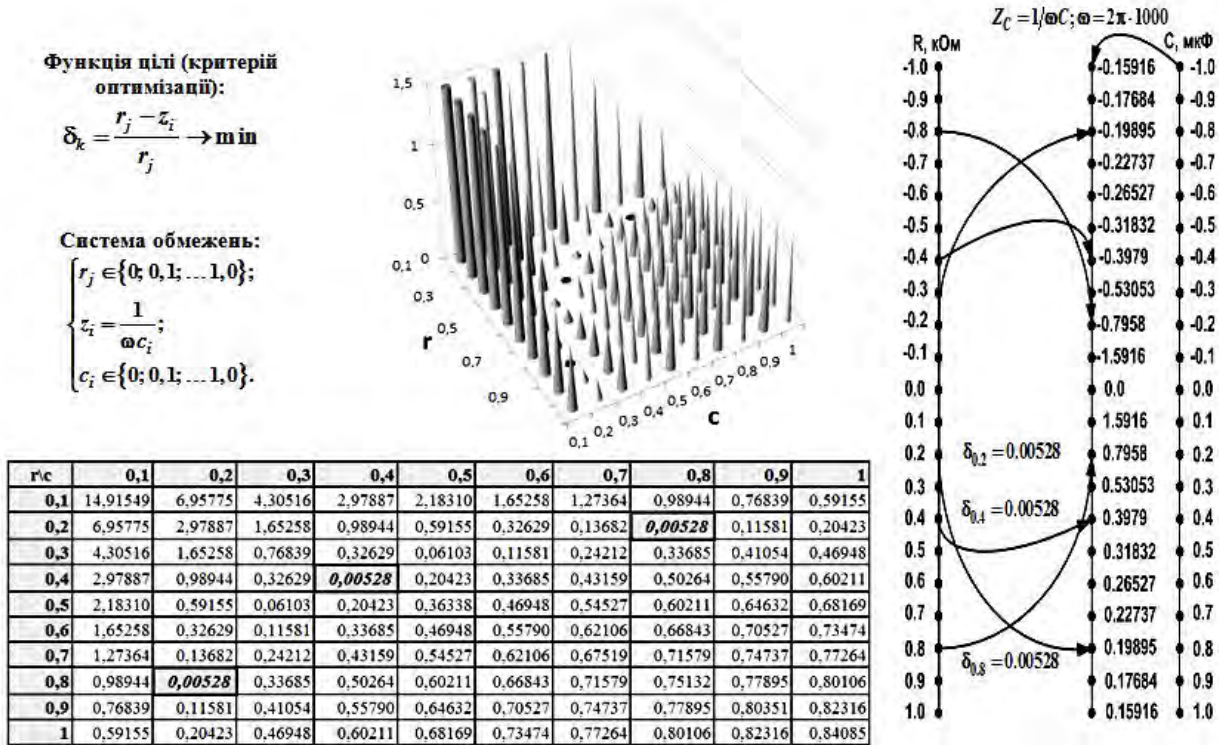


Рис. 2. Визначення сукупності точок оптимального компарування мір R та C на 1 кГц

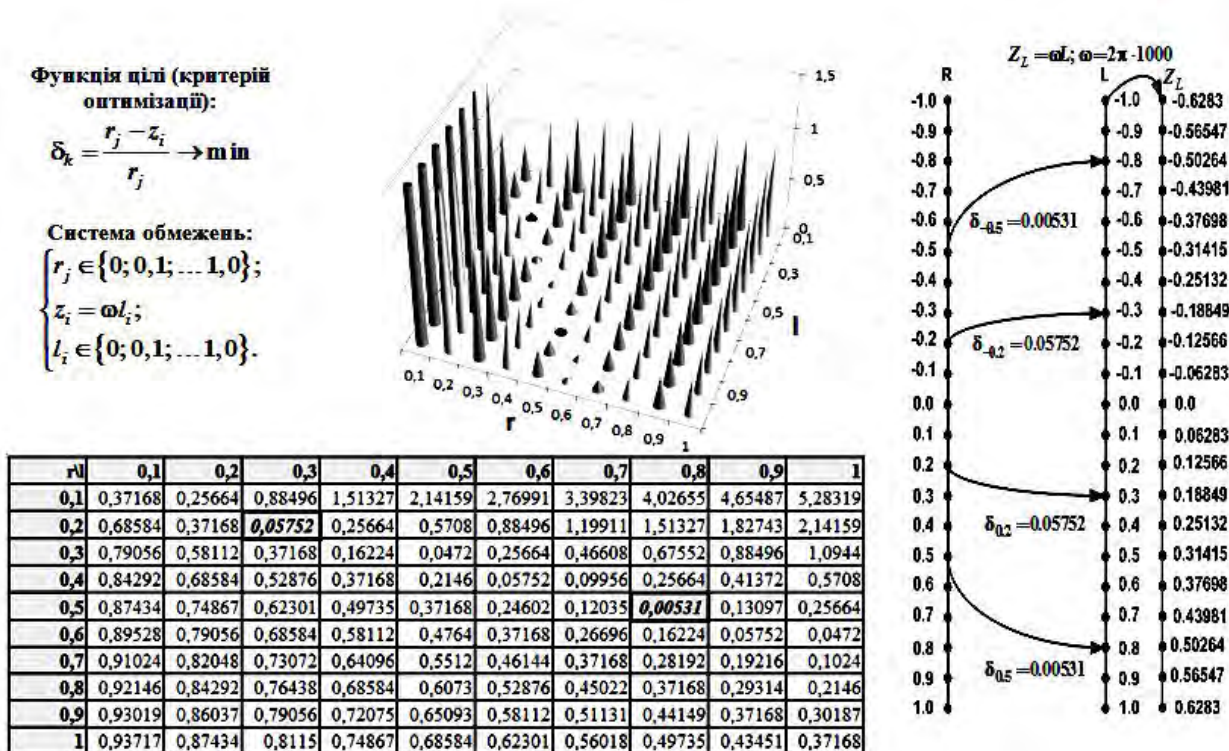


Рис. 3. Визначення сукупності точок оптимального компарування мір R та L на 1 кГц

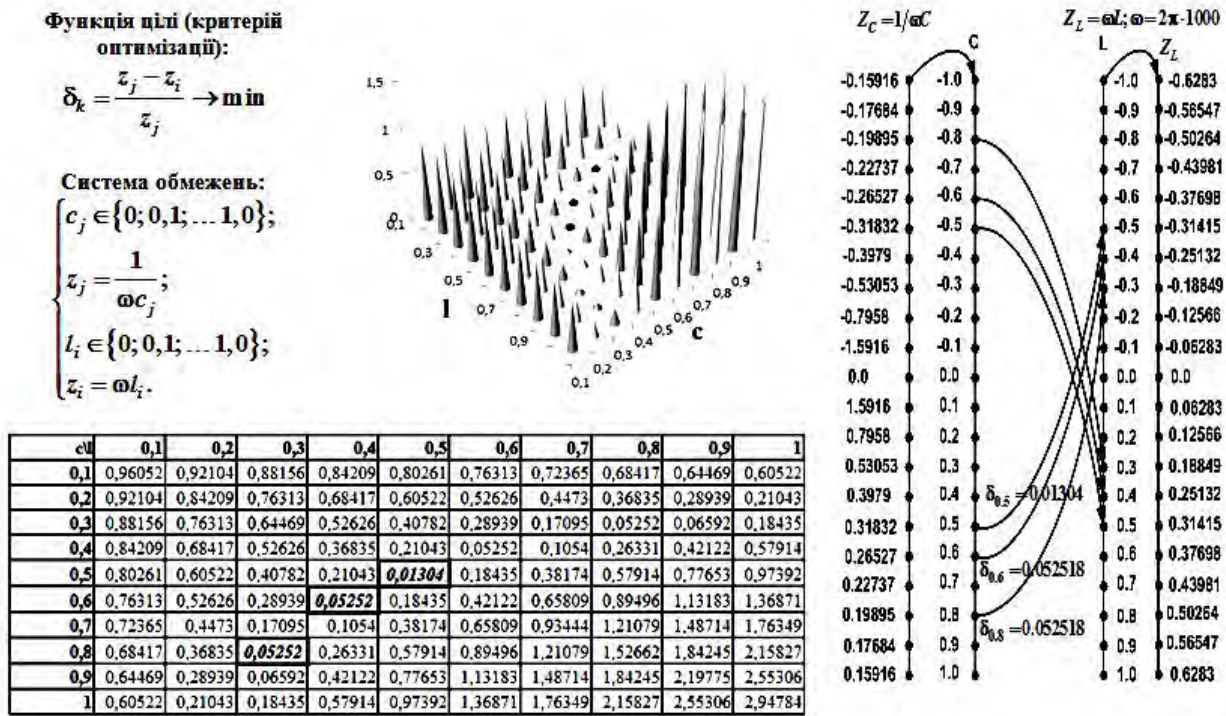


Рис. 4. Визначення сукупності точок оптимального компарування мір С та L на 1 кГц

Частотний хід сучасних мір індуктивності дуже великий і рідко відомий з необхідною точністю. Тому для усунення виниклої проблеми змінити робочу частоту компаратора на зазначені відхилення, як це було запропоновано для передавання виду $R \leftrightarrow C$, не можна. Запропоновано створити ємність, кратну 2,5 за допомогою паралельного з'єднання ємностей, кратних 2 і 0,5. З використанням такої міри можна проводити передавання розміру одиниці від міри ємності до десятимальних мір індуктивності. При цьому різниця відношення імпедансів відрізня-

ється від відношення плечей компаратора на величину близько відсотка і коригується додаванням відповідної додаткової міри ємності до основної міри.

На основі наведених вище досліджень і розрахунків побудовано близьку до оптимальної діаграму передавання одиниць імпедансу, наведену на рис. 5. Діаграма дає можливість передати розмір одиниці і здійснити калібрування всіх мір імпедансу у всьому діапазоні значень з опорю тільки на одну будь-яку міру.

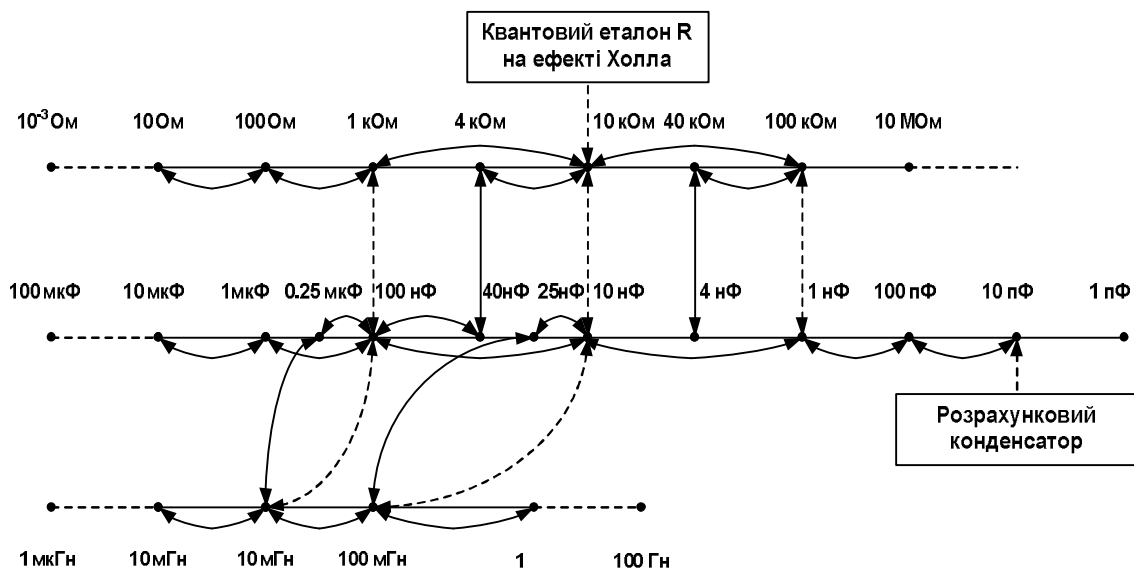


Рис. 5. Діаграма передавання одиниць імпедансу на 1 кГц

Висновки

На основі проведеного аналізу та експериментальних досліджень проведено оптимізацію схем передавання і способів відтворення одиниць вимірювань параметрів імпедансу, що сприяло підвищенню точності та суттєвому зменшенню собівартості метрологічних робіт на рівні державних первинних еталонів.

Розроблено метод пошуку точок передавання одиниці фізичної величини між різнорідними параметрами імпедансу, знайдено сукупності таких точок для досягнення найвищих метрологічних характеристик.

Запропоновано і розроблено методики мінімізації похибки передавання розміру одиниці параметру імпедансу з опорою на різнорідні еталони шляхом вибору оптимальної схеми передавання.

Результати роботи дозволили організувати проведення та успішно завершити міжнародні звірення національних еталонів електричної ємності та індуктивності на частоті 1 кГц.

Заключний звіт за темою COOMET.EM-S13 (554/UA/12) погоджено усіма національними метрологічними інститутами та міжнародними метрологічними організаціями, опубліковано на сайті КСДВ Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM), м. Париж [4 – 6].

Заключний звіт за проектом COOMET.EM-S14 погоджено усіма учасниками звірень та Головою Технічного комітету 1.3 COOMET «Електрика і магнетизм».

За результатами міжнародних звірень було відкориговано у зв'язку з підвищенням точності вимірювань смс-рядки на сайті BIPM, що сприяло укріпленню офіційного визнання ДП «Укрметртестстандарт» на міжнародному рівні та залученню до виконання метрологічних робіт більшої кількості вітчизняних та іноземних замовників [4].

Таким чином, за результатами роботи теоретично обґрунтовано і створено технічну та методичну основи для передавання одиниць параметрів імпедансу від міжнародних еталонів на фундаментальних фізичних константах до державних первинних еталонів при використанні у якості еталона передавання однієї будь-якої еталонної міри ємності, індуктивності або активного опору за умови збереження точності вимірювань на рівні провідних країн світу. При цьому забезпечене міжнародне визнання результатів вимірювань.

Список літератури

1. Klitzing V. K. *New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance* / V. K. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // *Phys. Rev. Lett.* – 1980. – No 45. – P. 494.
2. Delahaye F. *AC-bridges at BIMP* / F. Delahaye // *BNM-LCIE*, 1998. – P. C1–C6.
3. Сурду М.Н. *Прецизионный компаратор для воспроизведения единицы индуктивности и передачи ее размера в диапазоне значений* / М.Н. Сурду, А.А. Ахмадов, С.А. Ахмадов, С.Н. Курсин, А.Л. Ламеко, М.Я. Мухаровский // *Український метрологічний журнал*. – 2008. – № 4. – С. 14-22.
4. *Міжнародна база даних ключових звірень Міжнародного бюро з мір та ваг – КСДВ 816 [Електронний ресурс]*. – Режим доступу : <http://kcdb.bipm.org/>.
5. Velychko O. *Final Report on COOMET Supplementary Comparison of Capacitance at 10 pF and 100 pF (COOMET.EM-S13)* / O. Velychko, S. Shevkun. – Kyiv: SE “Ukrmetrteststandard”, February, 2013. – 20 pp.
6. Величко О. *Міжнародні звірення в рамках COOMET національних еталонів одиниць електричної ємності номіналом 10 і 100 нФ* / О. Величко, С. Шевкун // *Метрологія та прилади*. – 2015. – № 2. – С. 3-8.

Надійшла до редколегії 20.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ПЕРЕДАЧИ И СПОСОБОВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ПАРАМЕТРОВ ИМПЕДАНСА

С.Н. Шевкун, М.Н. Сурду, О.Н. Величко, М.В. Добролюбова

Разработан метод поиска точек передачи единицы физической величины между разнородными параметрами импеданса, найдены совокупности таких точек для достижения высоких метрологических характеристик, предложены методики минимизации погрешности передачи размеров единиц параметров импеданса с опорой на разнородные эталоны путем выбора оптимальной схемы передачи.

Ключевые слова: эталон, параметр импеданса, компарирование, оптимизация.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF TRANSMISSION SCHEMES AND REPRODUCING METHODS OF IMPEDANCE PARAMETERS UNITS

S.M. Shevkun, M.M. Surdu, O.M. Velychko, M.V. Dobroliubova

The method of finding points of the transmission unit of a physical quantity between dissimilar impedance parameters was developed. The sets of points to achievement of high metrological characteristics were found. Methods to minimize the error of transmission unit values parameters impedance relying on disparate standards by choosing of the optimal transmission scheme were proposed.

Keywords: standard, parameter of impedance, comparison, optimization.