



УДК 53.081

## РЕФОРМА SI ТА ПЕРЕБУДОВА СИСТЕМИ ЕТАЛОНІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ОДИНИЦЬ

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

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

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



П.І. Неєжмаков

Ю.Ф. Павленко

Н.М. Маслова

*Розглянуто проект реформи SI, що полягає в перевизначенні основних одиниць через фізичні сталі, а також пов'язану з цією реформою перебудову системи еталонів електричних одиниць.*

*The project of SI reorganization, that is redefinition of the basic units through physical constants, is considered. The restructuring of measurement standards system of electric units related to this reorganization is also analyzed.*

### Вступ. Суть реформи SI

У 2011 р. на XXIV Генеральній конференції з мір та ваг (CGPM) було прийнято рішення, до якого метрологи світу йшли вже близько десяти років. Це рішення полягало в проголошенні нових визначень основних одиниць Міжнародної системи SI, нової конфігурації SI в цілому і, за суттю, у створенні нової SI (New SI). Ось ключові моменти New SI:

- всі сім основних одиниць SI залишаються одиницями New SI, але одержують нові визначення;
- розміри одиниць у принципі не змінюються, але встановлюються шляхом "прив'язки" до фіксованого числового значення визначеної фізичної сталої (ФС);
- визначення всіх семи основних одиниць формулюються через сталі.

При цьому визначення чотирьох одиниць (ампера, кілограма, кельвіна, моля) змінюються суттєво, а у визначеннях трьох інших, які практично вже прив'язані до сталих (секунди, метра, кандели), лише змінюються формулювання. Наведемо ці визначення [1]:

- *кілограм* залишається одиницею маси, але її розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Планка  $h = 6,626\,068\,96 \times 10^{-34}$  точно при вираженні в одиниці SI  $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , що дорівнює Дж·с;

- *ампер* залишається одиницею електричного струму, але її розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення елементарного заряду  $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  точно при вираженні в одиниці SI с·А, що дорівнює Кл;

- *кельвін* залишається одиницею термодинамічної температури, але її розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Больцмана  $k = 1,380\,658 \times 10^{-23}$  точно при вираженні в одиниці SI  $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , що дорівнює Дж·К<sup>-1</sup>;

- *моль* залишається одиницею кількості речовини, яка містить певну кількість елементарних частинок, наприклад, атомів, молекул, іонів, електронів, а також інших частинок або певних груп частинок, але її розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Авогадро  $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  точно при вираженні в одиниці SI моль<sup>-1</sup>;

- *секунда* є одиницею часу; її розмір установлюється за допомогою фіксації числового значення частоти надтонкого розщеплювання атома цезію 133 в основному стані та за температури 0 К,  $\nu = 9\,192\,631\,770$  точно при вираженні в одиниці SI с<sup>-1</sup>, що еквівалентно Гц,

- *метр* є одиницею довжини; її розмір установлюється за допомогою фіксації числового значення швидкості світла у вакуумі  $c = 299\,792\,458$  точно при вираженні в одиниці SI м·с<sup>-1</sup>;

- *кандела* є одиницею сили світла в певному напрямі; її розмір установлюється за допомогою фіксації числового значення світлової ефективності монохромного випромінювання з частотою  $540 \times 10^{12}$  Гц  $K(\lambda) = 683$  точно при вираженні в одиниці SI  $\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{cd} \cdot \text{sr}$ , або  $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{Wt}^{-1}$ , що еквівалентно  $\text{lm} \cdot \text{Wt}^{-1}$ .

Символ "X" у цьому проекті є однією або кількома додатковими цифрами, які потрібно додати до числових значень  $h$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $N_A$ , що ґрунтується на

найостаннішому коректуванні Комітету з числових даних для науки і техніки (CODATA).

XXIV CGPM прийняла нові визначення і New SI, але не встановила точну дату їх офіційного введення в дію, оскільки не всі вимоги для цього було виконано. Тим не менш, як свідчать документи CGPM, цей процес є незворотнім, а якісь можливі уточнення не будуть носити принципового характеру.

Статтю присвячено розгляду впливу реформи SI на побудову еталонної бази в галузі електричних вимірювань.

### 1. Коротка історія. Система еталонів електричних одиниць у рамках існуючої SI

Не поринаючи у глибоку історію метрології в електриці, нагадаємо, що у 1927 р. був створений Консультативний комітет з електрики при Міжнародному комітеті мір та ваг (CIPM), який почав роботу з перевизначення одиниць. У 1933 р. CIPM за рекомендацією цього комітету прийняв рішення про відтворення електричних одиниць через механічні. Перше успішне відтворення ампера було проведено в США вже в наступному році. У цьому експерименті значення сили струму визначалося за силою взаємодії двох дуже точно виготовлених котушок, через які протікав вимірюваний струм. Таким чином, було доведено можливість відтворення ампера через одиниці сили і довжини.

У 1946 р. CIPM рекомендував такі визначення одиниць до міжнародного застосування:

*ампер* – сила незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини з нехтовно малою площею кругового поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликає би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює  $2 \cdot 10^{-7}$  ньютона;

*вольт* – напруга на кінцях провідника, при якій струм в 1 ампер створює потужність в 1 ват;

*ом* – опір провідника, при якому напруга на кінцях провідника в 1 вольт створює струм в 1 ампер.

У 1960 р. ці визначення увійшли в систему SI, прийняту на XI CGPM, і діють по цей час.

Одиниці, що відтворюються у відповідності до цих визначень, пропонувалося називати абсолютними. Такі визначення були ідеальні з точки зору узгодження одиниць і абсолютних вимірювань у наукових експериментах, але вкрай незручні для практичного застосування. Наприклад, відтворення абсолютного ампера проводилися рідко, тому що були досить складні і дорогі.

На практиці способи відтворення одиниць електричних величин SI ніколи не відповідали повною мірою їх визначенням. Визначення ампера у 1946 р. не мало за мету проведення експериментів, а було лише основою для розрахунку значень струмів через взаємодію реальних провідників, оскільки система з двох нескінченних паралельних провідників

нульового діаметра ідеальна і на практиці неможлива. У реальних умовах довжина проводів завжди скінченна, як і їхня товщина. Крім того, для підвищення точності вимірювань сили взаємодії проводів цю силу необхідно зробити досить великою. Тому зазвичай вимірюється сила взаємодії не між парою проводів, а між двома котушками з великою кількістю витків дроту. Кінцеві розміри і ненульова товщина проводів котушок роблять необхідним розрахунок пов'язаних з цими відмінностями магнітних полів, і результат залежить не тільки від відстані між котушками, але і від їхніх розмірів, форми, товщини, неоднорідності проводів тощо. В усіх експериментах, де розмір ампера відтворюється за силою взаємодії котушок зі струмом, саме неточність визначення геометричних параметрів дає найбільший внесок у результуючу невизначеність. Вона становила кілька одиниць на  $10^{-5}$  і залежала від точності виготовлення котушок і визначення відстані між ними. Незважаючи на суттєвий прогрес у досягненні точності в наступних експериментах, обмеження на їхню невизначеність, що накладається технологічними можливостями виготовлення котушок з розрахунковою формою, залишалося головним. В експерименті зі "струмовими вагами" 1958 р. невизначеність було знижено до  $5 \cdot 10^{-6}$ , що, мабуть, близько до межі можливостей методу [2].

До 1989 р. не було запропоновано жодного досить точного способу порівняння електричної і механічної потужностей. Тому в якості необхідної для побудови системи електричних величин другої одиниці традиційно використовувався ом. Перший експеримент з відтворення ома в одиницях SI відбувся в 1936 р.: електричний опір порівнювався з імпедансом розрахункової котушки індуктивності. Як і при відтворенні ампера, для розрахунку індуктивності були потрібні точні вимірювання геометричних параметрів котушки, і їхня неточність була основною складовою невизначеності відтворення ома. Іншими недоліками такого методу були дорожнеча і громіздкість використовуваних котушок, що було обумовлено необхідністю досягнення досить великого значення індуктивності без використання феромагнітних сердечників, які значно збільшують невизначеність результатів вимірювань.

Додамо, що і одиниці магнітних величин, зокрема, магнітної індукції, визначалися через струм і розрахункову котушку з усіма недоліками цього методу.

У 1956 р. був винайдений більш точний метод відтворення ома за допомогою так званого *розрахункового конденсатора* на основі теореми Томпсона-Лампарда, у якого невизначеність ємності була меншою, ніж невизначеність розрахункової індуктивності котушки, тому що результати розрахунків істотно менше залежали від геометричних розмірів і форми пристрою [3, 4]. Але й створення розрахункового конденсатора суттєво не поліпшило ситуацію в електричних вимірюваннях.

Ставилися також експерименти щодо відтворення вольт за вимірюваннями електростатичної сили між двома зарядженими тілами в ньютонах (вольт-ваги), але й ці експерименти виявилися досить складними, дорогими і забирали багато часу. Щоб забезпечити потреби практичної метрології, національним лабораторіям було рекомендовано зберігати розміри вольт і ома у вигляді артефактів, тобто у вигляді наборів мір відповідних величин. Вольт зберігався у вигляді середнього значення напруги групи так званих *нормальних елементів* – хімічних джерел ЕРС, а ом – групою котушок, виготовлених із металевих сплавів зі стабільним у часі і слабо залежним від температури опором. Групи мір напруги та опору служили і практичними національними еталонами. Для підтримки міжнародної єдності вимірювань проводилися регулярно міжнародні звірення.

Схему реалізації електричних одиниць за методологією “механічних вимірювань” наведено на рис. 1.

З підвищенням точності вимірювань потенційні можливості засобів вимірювань електричних величин все більше вступали в протиріччя з точністю, з якою були відомі розміри самих цих одиниць. Визначення одиниць, розроблені ще перед другою світовою війною, виявилися не в змозі забезпечити необхідну точність відтворення не тільки основної одиниці системи SI – ампера, але і вата, і вже тим більше інших електричних одиниць. Криза, яка виникла, була частково розв’язана прийняттям СІРМ рішення про побудову *практичної системи* одиниць електричних величин на основі рекомендованих реперних значень електричних опорів та напруги, відтворених за допомогою макроскопічних квантових ефектів. Це були вже відомі на той час *ефект ядерного магнітного ре-*

*зонансу, ефект Джозефсона, квантовий ефект Холла.*

У 1988 р. СІРМ затвердив значення сталих Джозефсона і Клітцинга і рекомендував, починаючи з 1 січня 1990 р., відтворювати вольт на основі ефекту Джозефсона, вважаючи константу Джозефсона  $K_{Дж} = K_{J-90} = 483597,9$  ГГц/В, а ом – на основі квантового ефекту Холла, вважаючи константу Клітцинга  $R_K = R_{K-90} = 25812,807$  Ом. Це було дуже важливе рішення, яке суттєво змінило ситуацію в електричних вимірюваннях. Розглянемо коротко ці ефекти.

## 2. Квантові ефекти та еталони електричних одиниць на їх основі

Відкриття квантових ефектів (у порядку хронології): ядерного магнітного резонансу (Блох, Парсель, 1946 р.), Джозефсона (1962 р.), Холла (Клітцинг, 1980 р.) – зробило, без перебільшення, революцію в метрології в галузі електрики. З’явилася реальна можливість кардинально підвищити точність відтворення ряду електричних одиниць.

*Ефект ядерного магнітного резонансу (ЯМР)* дозволяє визначити індукцію магнітного поля  $B$  шляхом вимірювання частоти прецесії  $f$  системи атомних ядер у зразку речовини, яку поміщено в магнітне поле [5, 6]:

$$B_{ЯМР} = \frac{2\pi f_{ЯМР}}{\gamma}$$

де  $\gamma$  – гіромагнітне відношення робочої речовини.

Найбільш широко для вимірювання використовуються ядра водню – протони та їхнє гіромагнітне відношення  $\gamma_p$ , що є однією з фундаментальних фізичних сталих (ФФС). Відзначимо, що одне з найбільш точних визначень  $\gamma_p$  було проведено в ННЦ “Інститут метрології” (тоді – ХДНДІМ) [7].

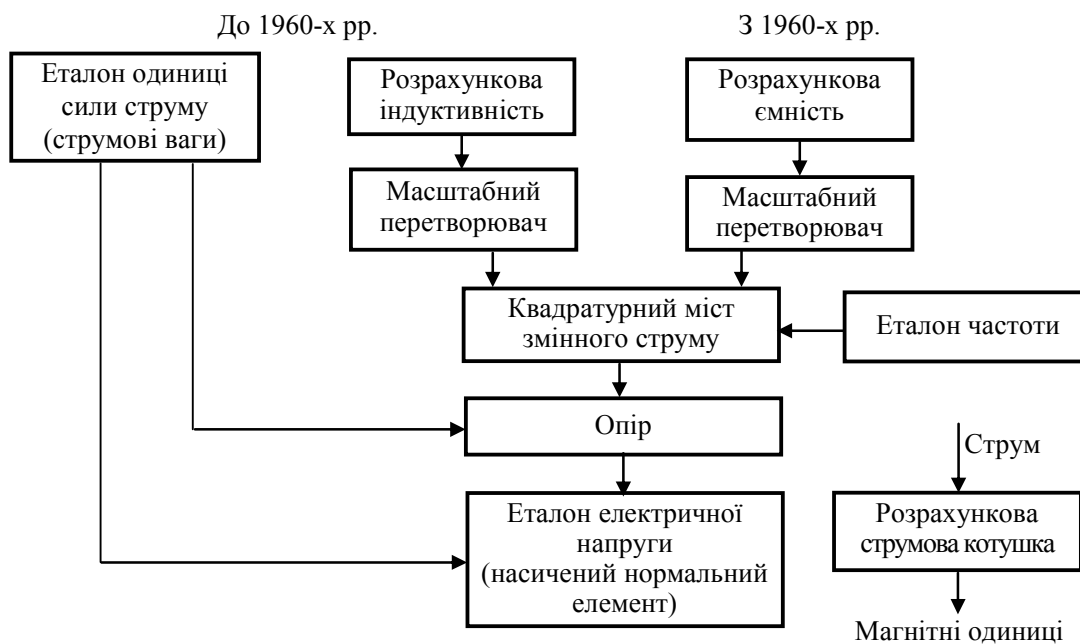


Рис. 1. Схема реалізації електричних одиниць за методологією “механічних вимірювань”

Ефект Джозефсона дозволяє відтворювати значення постійної напруги  $U_{Дж}$  шляхом опромінення спеціальної надпровідної структури, що знаходиться в криогенному середовищі, НВЧ-сигналом частотою  $f_0$  відповідно до виразу [8, 9]

$$U_{Дж} = n \frac{h}{2e} f_0,$$

де  $2e/h = K_{Дж}$  – стала Джозефсона;  $n=1, 2, 3, \dots$  – ціле число.

Квантовий ефект Холла також реалізується за допомогою спеціальної надпровідної структури, поміщеної в магнітне поле, і дає можливість відтворювати фіксовані значення електричного опору [10, 11]

$$R_x = \frac{h}{me^2},$$

де  $h/e^2 = R_K$  – константа Клітцинга;  $m=1, 2, 3, \dots$

На базі цих ефектів створено національні еталони в багатьох країнах, у тому числі в Україні [12, 13].

Говорячи про квантові ефекти, згадаємо також про ефект “одноелектронного тунелювання” або ефект Ліхарєва (у витоків ефекту стояв російський учений Ліхарєв) [14], про який мова піде нижче.

Нагадаємо, що використання квантових ефектів для відтворення електричних одиниць фактично означає паралельне існування двох систем: SI, в якій діють наведені вище визначення електричних одиниць через механічні, і практичної, де одиниці визначаються через ФС [15]. Цей дуалізм, безумовно, повинен бути усунений, що є одним із завдань реформи SI.

### 3. Еталон ампера на основі квантових ефектів

Закон Ома дає можливість опосередкованого відтворення ампера на основі “квантового вольт” і “квантового ома”. У спрощеному вигляді схему відтворення “квантового ампера” подано на рис. 2 [16].

До вимірювального пристрою входять міри постійної напруги і електричного опору, відкаліб-

ровані за квантовими ефектами Джозефсона і Холла відповідно, а також прецизійне (за стабільністю) джерело струму і струмовий компаратор. За допомогою останнього розмір одиниці сили струму, “народжений” у колі 1, передається у коло 2.

Сила струму знаходиться за виразом

$$I = \frac{U_{Дж}}{R_x},$$

де  $U_{Дж}$ ,  $R_x$  – електричні напруга і опір, визначені шляхом порівняння з мірами на квантових ефектах Джозефсона і Холла:

$$U_{Дж} = n \frac{h}{2e} f_0 = n f_0 K_{Дж}^{-1};$$

$$R_x = \frac{h}{me^2} = \frac{1}{m} R_K.$$

Тоді сила струму дорівнює

$$I = n K_{Дж}^{-1} m R_K^{-1} f_0 = \frac{1}{2} n m e f_0,$$

де  $n, m$  – цілі числа;  $f$  – частота опромінення;  $K_{Дж}$  і  $R_K$  – сталі Джозефсона і Клітцинга, відповідно.

Таким чином, ампер відтворюється через частоту і сталі Джозефсона і Клітцинга (або через частоту і елементарний заряд).

На цьому принципі створено еталони у ряді країн, зокрема, в Росії. У цьому еталоні невиключена систематична похибка відтворення сили струму в діапазоні від  $1 \cdot 10^{-3}$  до 1 А становить  $2 \cdot 10^{-7}$  при СКВ випадкової похибки  $5 \cdot 10^{-8}$  [16].

Неважко бачити, що в такій реалізації ампер втрачає ознаки основної одиниці і стає похідною, простежується до елементарного заряду  $e$  (або сталей Джозефсона і Клітцинга).

### 4. Перспектива прямого відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання

Ефект одноелектронного тунелювання або “ефект Ліхарєва” було теоретично передбачено і експериментально перевірено ще у 80-і роки минулого століття [14].

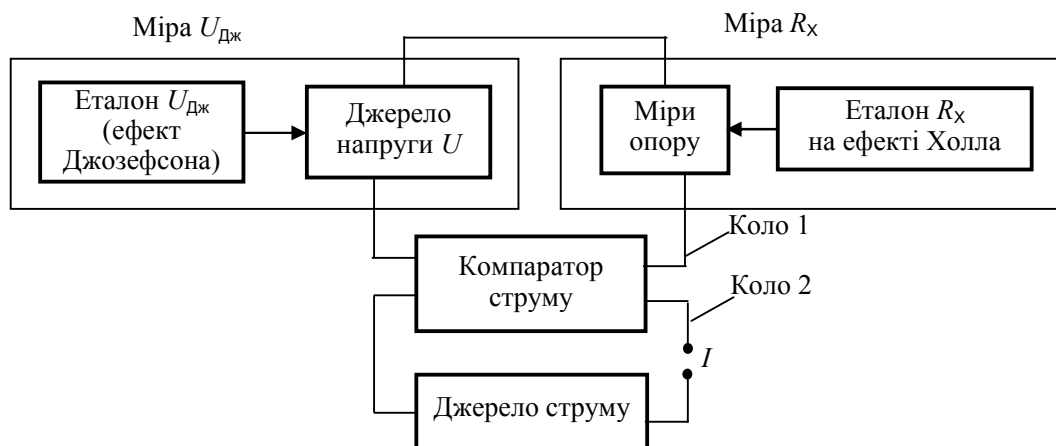


Рис. 2. Схема опосередкованого відтворення “квантового” ампера

Цей ефект виявляється у виникненні сходнок на осі струму вольтамперних характеристик надпровідних джозефсонівських переходів малої ємності при їх опроміненні НВЧ-полем (у відмінності від класичного джозефсонівського ефекту, де ці сходинки мають місце на осі напруги). При цьому відстань між сходинками (тобто значення сили струму  $I$ ) залежить лише від частоти проходження електронів  $f$  і сталої – заряду електрона  $e$ :  $I = ef$ . Це відкриває шлях до побудови квантового еталона ампера на основі цього ефекту. Оскільки квантові еталони вольта й ома вже існують, створення квантового еталона ампера дозволить замкнути так званий “трикутник квантових еталонів” (рис. 3), тобто незалежне відтворення трьох базових електричних одиниць на основі квантових ефектів може стати серйозним імпульсом до подальшого розвитку метрології в електриці.

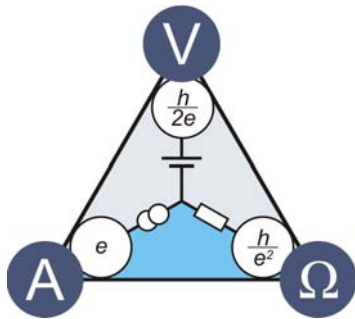


Рис. 3. “Трикутник” квантових еталонів

Роботи зі створення джерела струму на ефекті одноелектронного тунелювання, необхідного для замикання квантового трикутника, ведуться вже близько двадцяти років у багатьох країнах, і в цьому напрямку досягнуто певних успіхів.

Сьогодні відомо кілька варіантів приладів на ефекті одноелектронного тунелювання (SET – Single Electron Tunneling): так званий одноелектронний транзистор (SET-транзистор), виготовлений з використанням нанотехнологій [17] в Національному інституті стандартів і технологій (NIST, США) сумісно з Московським державним університетом (МГУ, Росія) і Федеральним фізико-технічним інститутом (РТВ, Німеччина), а також більш складний пристрій, названий одноелектронним насосом (SET-pump) [18].

У США було створено електронний насос із сімома тунельними переходами і шістьма затворами. У результаті, за оцінками авторів, похибка рахування окремих електронів знизилася до  $1,5 \times 10^{-8}$ . Проте максимально досягнуте значення струму на плато  $6 \cdot 10^{-12}$  А при частоті маніпулювання електронами  $f = 20$  МГц є все ще малим для прецизійних вимірювань [19].

У рамках проекту Євросоюзу в РТВ був створений електронний насос з трьома тунельними переходами, в якому пригнічення ефектів паразитного додаткового тунелювання досягається напilen-

ням додаткових високоомних (50 кОм) резисторів, послідовно підключених до виводів пристрою (R-pump). Вагомі оригінальні роботи в цьому напрямку було також проведено в метрологічному центрі Франції BNM-LNE.

У зв'язку з труднощами реалізації джерела струму, що базується на SET-пристроях, NIST (США) було запропоновано інший шлях проведення експериментів щодо встановлення зв'язку квантових еталонів вольта, ома і ампера [20]. Там, а пізніше і в РТВ, розгорнуто роботи зі створення еталона одиниці ємності – фаради, що ґрунтується на виготовленні криогенного конденсатора ємністю  $1 \dots 10$  пФ з надмалим рівнем витоків і малою залежністю ємності від частоти і напруги. Цей конденсатор спочатку заряджають за допомогою джерела одиночних електронів – електронного насоса, а електрони перераховуються електрометром на основі SET-транзистора. Напругу на конденсаторі передбачається вимірювати за допомогою еталона, що використовує ефект Джозефсона. У результаті ємність криогенного конденсатора буде виражено через фундаментальні константи  $e$ ,  $h$ , НВЧ-частоту і цілі числа – номер сходинки на вольт-амперній характеристиці (ВАХ) джозефсонівської мікросхеми і число електронів, розміщених на конденсаторі.

У наступному експерименті імпеданс конденсатора порівнюється з опором, відтвореним за допомогою холлівської структури (рис. 4), на змінному струмі, з використанням моста – компаратора і еталонної частоти  $f_e$ .

Згідно з оцінками, є надія реалізувати вимірювання з невизначеністю  $10^{-8}$ , однак досягти такого результату буде дуже важко.

Як видно з наведеного короткого огляду, до теперішнього часу на основі ефекту одноелектронного тунелювання вже створено ціле покоління принципово нових пристроїв. Однак завдання замикання трикутника квантової метрології ще далеке від вирішення.

## 5. Відтворення одиниць ємності та індуктивності

В основі відтворення параметрів електричних кіл (опору, індуктивності, ємності) лежить *мостовий метод*. Мости змінного струму, як відомо, дозволяють порівнювати комплексні опори, що знаходяться в різних фазах, наприклад, вимірювати ємнісний або індуктивний опір шляхом порівняння з еталонним активним опором  $R_e$  на відомій частоті  $f_e$  [21].

У свій час було розроблено ряд модифікацій мостів змінного струму. На сьогодні одним з кращих за метрологічними характеристиками вважається міст-компаратор, розроблений Інститутом електродинаміки НАН України [22]. За наявності еталонних мір активного опору  $R_e$  і частоти  $f_e$  можуть бути проведені вимірювання ємності і індуктивності за еквівалентними формулами

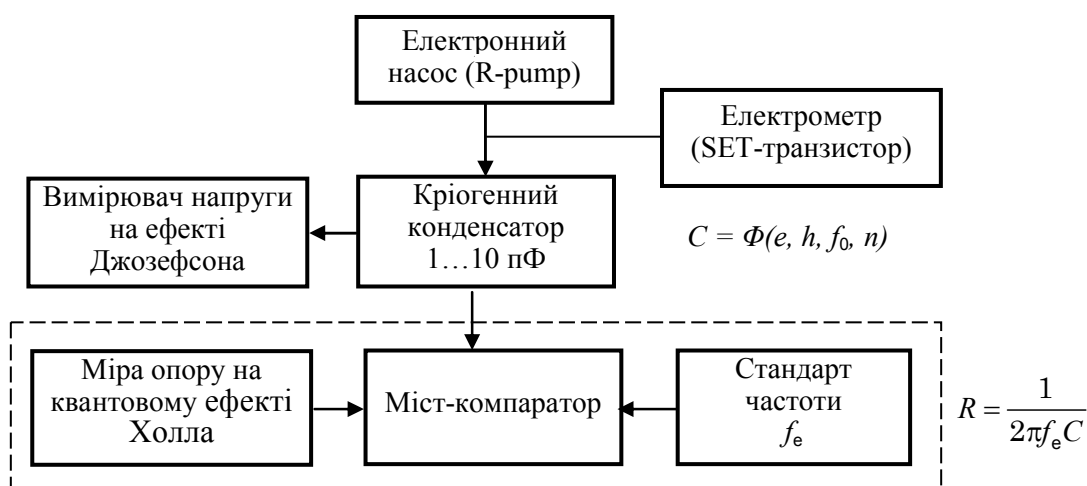


Рис. 4. Варіант реалізації трикутника квантової метрології

$$C = \frac{K_M}{R_e 2\pi f_e}; L = \frac{R_e}{2\pi f_e} K_M,$$

де  $K_M$  – стала моста, яка залежить від його конст-руктивних особливостей і відома з нехтовно малою невизначеністю.

Якщо  $R_e$  установлено за квантовим ефектом Холла, то  $C$  і  $L$  може бути подано через  $\Phi$ ФС і частоту:

$$C = \frac{m e^2}{h 2\pi f_e}; L = \frac{1}{m e^2} \frac{R_e}{2\pi f_e},$$

де  $m$  – ціле число (номер плато на характеристиці ефекту Холла).

Найменша досягнута на сьогодні стандартна невизначеність відтворення одиниць ємності і індуктивності становить близько  $1 \cdot 10^{-7}$ .

Таким чином, зв'язок базових електричних одиниць з  $\Phi$ ФС у New SI можна відобразити у вигляді, наведеному на рис. 5.

Як бачимо, при використанні квантових ефектів і нових визначень усі одиниці простежуються до сталих  $e, h, v_{CS}, \gamma_p$ , тобто взаємоузгодженість еталонів відбувається за допомогою цих сталих. При цьому невизначеність відтворення цих одиниць приблизно на 2–3 порядки менша, ніж при діючих сьогодні визначеннях через механічні величини.

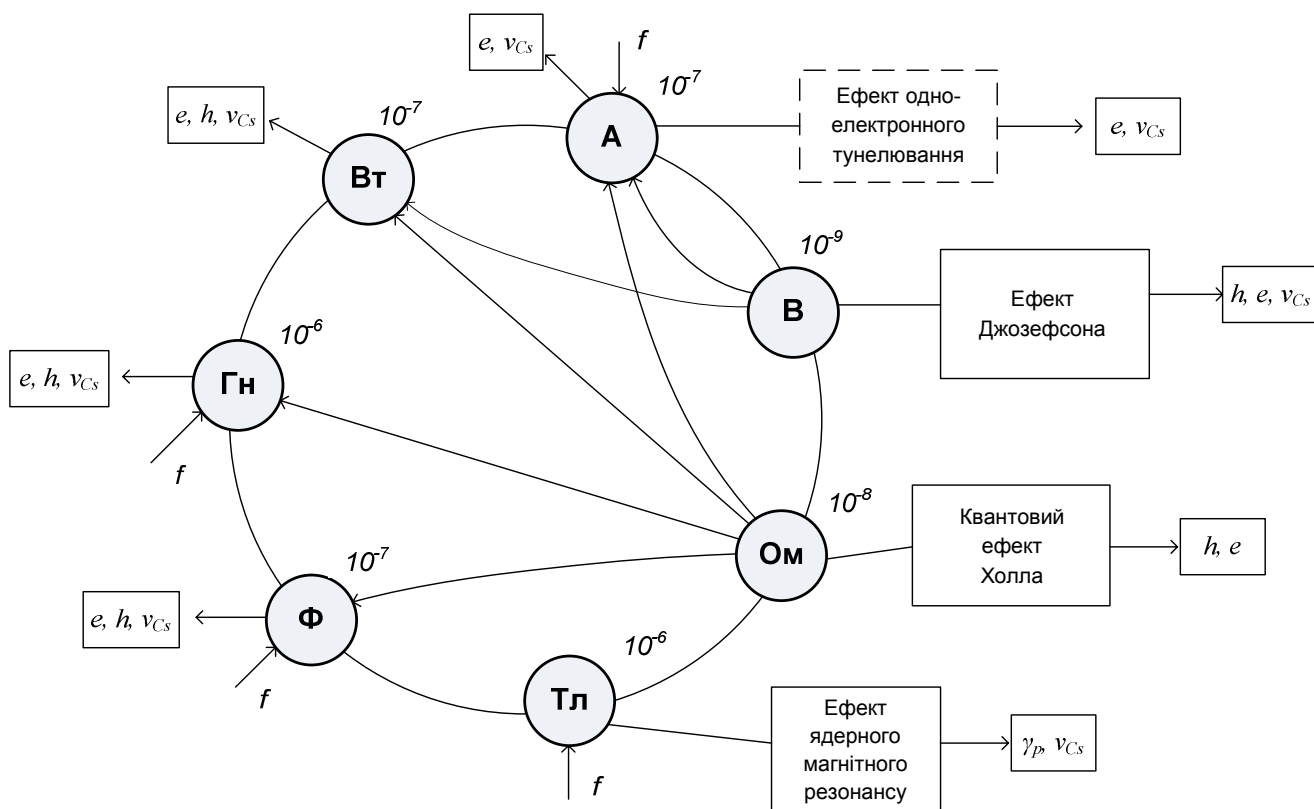


Рис. 5. Зв'язок електричних одиниць з  $\Phi$ ФС у New SI

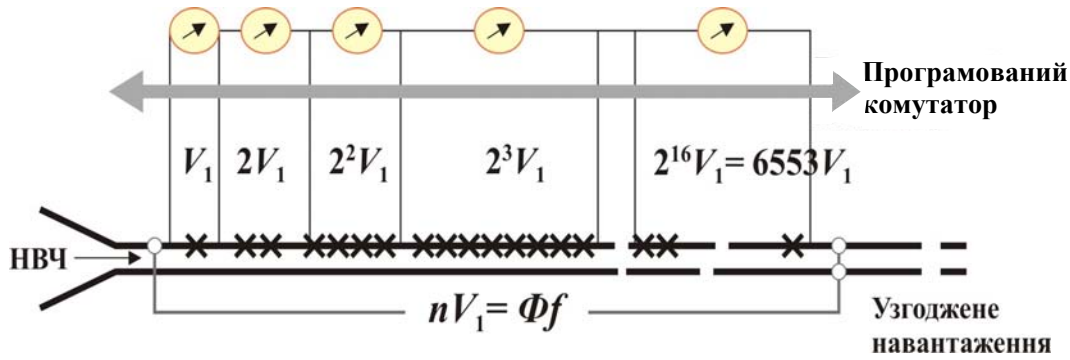


Рис. 6. Динамічна матриця

### 6. Передача розмірів одиниць сили струму та напруги з постійного на змінний струм

Вище було наведено методи відтворення вольта і ампера за допомогою квантових ефектів на постійному струмі. Передача розміру цих одиниць на змінний струм (AC-DC-transfer) відбувається за допомогою методу теплового компарування, визнаного найбільш точним (не враховуючи розглянутий нижче метод Джозефсона). При цьому зберігається простежуваність одиниць сили змінного струму і змінної напруги до одиниць ФФС (з доданням похибки AC-DC-перетворення). Аналогічно на основі методу теплового компарування відтворюються одиниці інших параметрів інтенсивності – потужності і напруженості електромагнітного поля – у широкому діапазоні частот.

### 7. Перспективи використання ефекту Джозефсона для відтворення змінної напруги

Окрім розглянутої на попередніх етапах функції відтворення сталої напруги, ефект Джозефсона може бути використаний для відтворення змінної напруги. Дослідження в цьому напрямку ведуться у технологічно розвинених країнах світу і обіцяють значний подальший крок у підвищенні точності електричних вимірювань.

Формування еталонної напруги змінного струму може бути виконано такими методами:

- а) шляхом синтезу відліків сталої напруги  $U_i$  за допомогою так званих динамічних програмованих матриць;
- б) кодоімпульсним методом;
- в) шляхом частотної модуляції НВЧ-сигналу, що використовується для опромінення матриці (запропоновано ННЦ “Інститут метрології”).

Розглянемо коротко на основі публікацій РТВ перші два методи, за допомогою яких одержано найкращі результати.

**Метод синтезу відліків** [23, 24] полягає в отриманні серії дискретних відліків сталої напруги з виводів джозефсонівської матриці, розташованих, наприклад, за двоїчним кодом (рис. 6), і формуванні східчастого сигналу змінного струму (рис. 7). Основною проблемою в реалізації цього методу є створення спеціальних матриць, які одержали назву динамічних (програмованих).

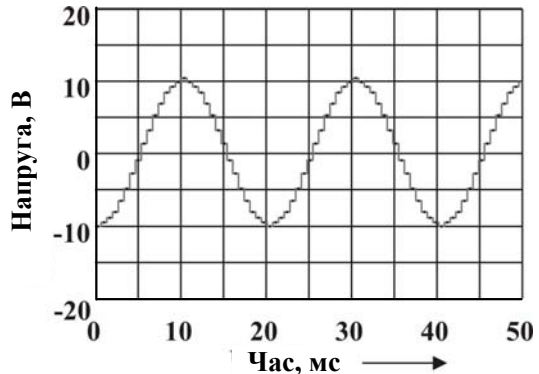


Рис. 7. Сформований східчастий сигнал змінного струму

Для відтворення напруги змінного струму необхідна швидка і точна перекомутація опорних напруг Джозефсона. Як показано в дослідженнях РТВ, таку можливість надають тільки лінійні матриці сильно загасаючих переходів: SNS (надпровідник – нормальний метал – надпровідник) і SINIS (надпровідник – ізолятор – нормальний метал – ізолятор – надпровідник) [23], з великою кількістю послідовно включених джозефсонівських переходів.

Ці матриці дають можливість установлювати задану опорну напругу при певному струмі зсуву, однак при цьому збільшується необхідне число переходів.

Матриця із частотою 70 ГГц вимагає близько 70 000 переходів для одержання змінної напруги 10 В, що в 5 раз більше, ніж у стандартній матриці для одержання постійної напруги. Це говорить про те, що технології виробництва матриць сильно загасаючих переходів мають бути на значно вищому рівні.

Тому для конструювання програмованих еталонів напруги було запропоновано використовувати послідовні малоінерційні матриці з відповідними НВЧ-колами. У цьому випадку кожний окремий контакт вкладає цілком певне число відліків постійної напруги в сумарну зразкову напругу. У результаті вихідна напруга є однозначною, й система автоматично повертається до встановленої зразкової напруги у випадку втрати фазової синхронізації на короткий час.

**Кодоімпульсний метод**, розроблений в РТВ, полягає у використанні для опромінення матриці

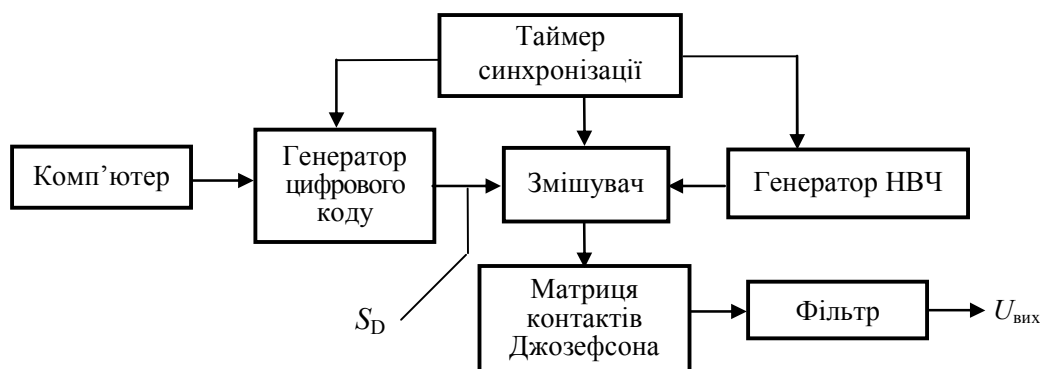


Рис. 8. Спрощена структурна схема кодоімпульсного методу

замість синусоїдального сигналу послідовності імпульсів зі змінною частотою повторення, яка одержується за допомогою сигма-дельта модуляції [25].

Спрощену структурну схему для реалізації цього методу наведено на рис. 8.

Імпульси подаються на лінійні матриці переходів Джозефсона, які перетворюють їх у точно квантовані імпульси з площею імпульсу  $nh/2e$ . Далі за допомогою аналогової низькочастотної фільтрації одержують необхідні форми хвиль (рис. 9).

Важливим питанням при формуванні еталонної змінної напруги є рівень нелінійних спотворень відносно заданої форми (при синусоїдальній формі – рівень коефіцієнта гармонік). Одержаний в РТВ спектр синтезованої синусоїдної хвилі час-

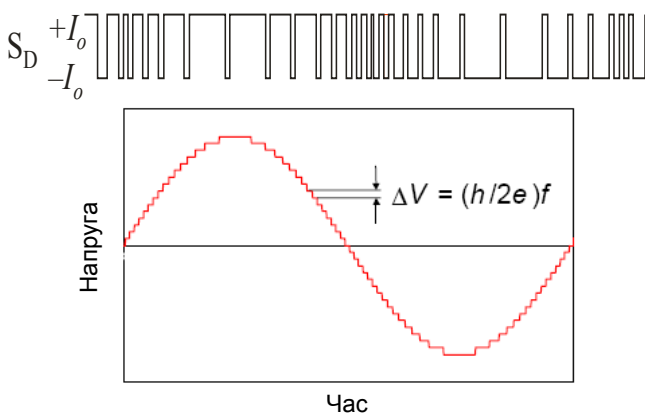


Рис. 9. Опромінюючий і вихідний сигнали в кодоімпульсному методі

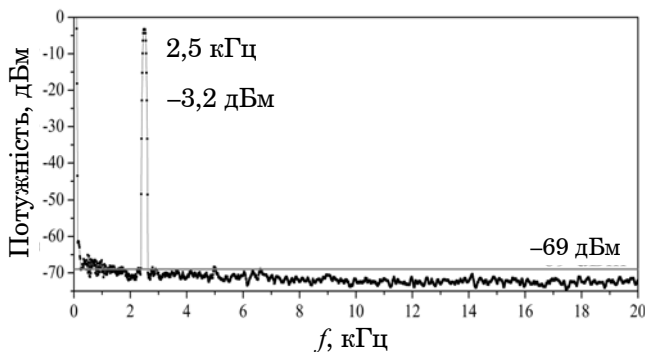


Рис. 10. Спектр синусоїдної хвилі частотою 2,5 кГц із максимальною амплітудою напруги 214 мВ

тотою 2,5 кГц із максимальною амплітудою напруги 214 мВ зображено на рис. 10. Більш високі гармоніки перебувають на рівні нижче  $-70$  дБм (коефіцієнт гармонік нехтовно малий), що, безсумнівно, є високим результатом.

Основною проблемою для досягнення напруг змінного струму великої амплітуди є конструкція необхідного мікрохвильового кола для однорідного розподілу імпульсів у достатньо великих матрицях.

Як показано в [25, 26], метод із використанням програмованої джозефсонівської матриці (PJVS-метод) забезпечує високу вихідну напругу (до 10 В), однак її спектр містить чималу кількість гармонік (значні спотворення). Кодо-імпульсний метод (JAWS-метод) забезпечує чистий спектр, але рівень вихідного сигналу не перевищує 1 В.

В останні роки в РТВ розроблено комбінований (PJVS+JAWS) метод, який поєднує позитивні якості обох методів, тобто дозволяє одержати рівень напруги до 10 В з високою спектральною чистотою [26]. Невизначеність відтворення синусоїдальної напруги оцінюється значенням  $(3...5) \cdot 10^{-8}$ , частота до 200 кГц.

Хоча використання ефекту Джозефсона не забезпечує таких широких частотного і динамічного діапазонів відтворення змінної напруги, як метод теплового компарування (дивись вище), але він має на кілька порядків меншу невизначеність у НЧ-діапазоні і, безумовно, займе своє особливе місце в метрології електричних вимірювань.

## 8. Система електричних еталонів у New SI

Відкриття квантових ефектів і розробка на їх основі еталонів ряду електричних одиниць створили передумови для переходу до принципово нової системи еталонів у галузі електрорадіовимірювань. Розглянуті вище квантові еталони разом із еталонном одиниць часу – частоти (на квантовому ефекті переходу  $Cs^{133}$ ), завдяки високій точності, надійності та доступності, стали базовими еталонами цієї системи.

Схему відтворення найбільш уживаних одиниць у галузі електричних вимірювань наведено на рис. 11. Із цієї схеми видно взаємозв'язок усіх



електричних величин і одиниць, їхню простежуваність до ФФС, що дозволяє говорити про взаємозгодженість електричних одиниць в рамках New SI.

У таблиці наводиться порівняння методів відтворення базових електричних одиниць в SI і New SI.

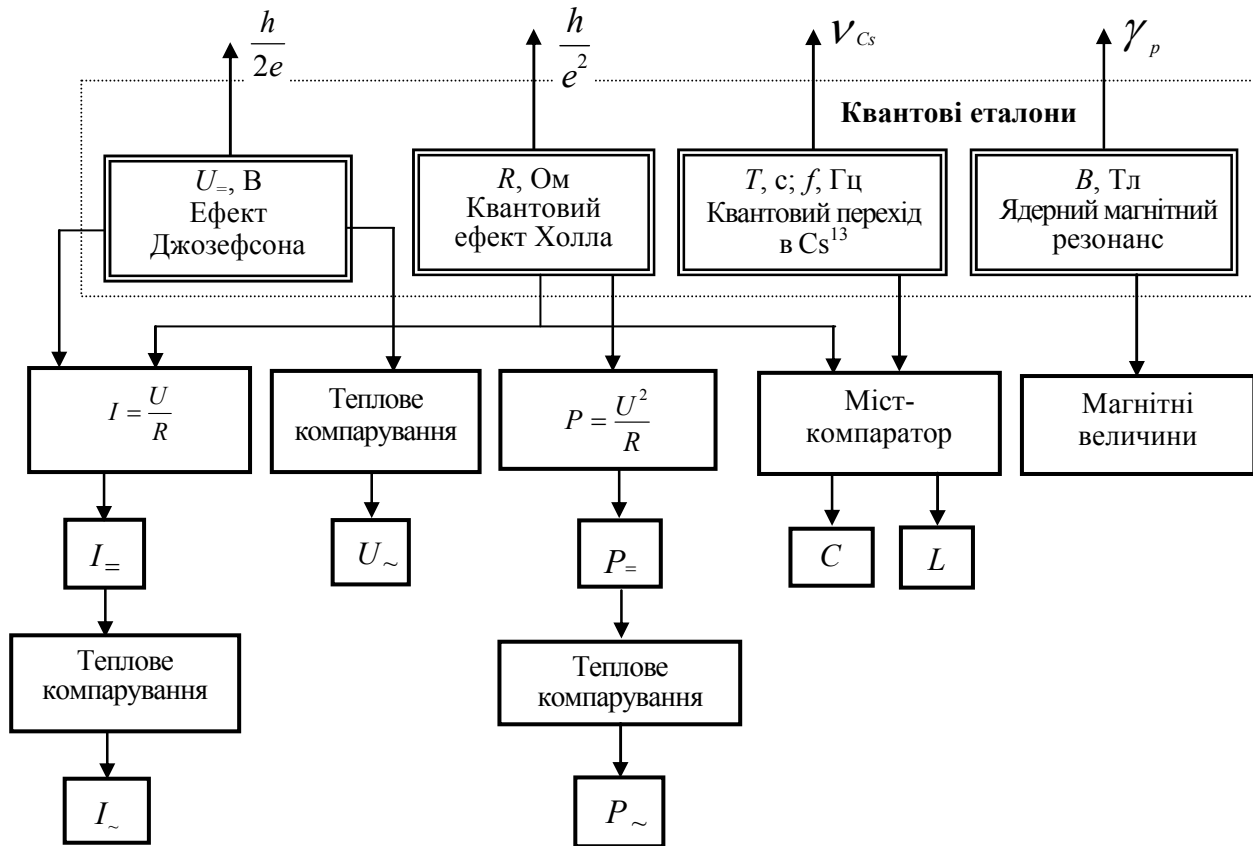


Рис. 11. Схема відтворення одиниць у галузі електричних вимірювань у New SI

Одиниця	Відтворення в SI	Відтворення в New SI
Ампер	Через механічні величини за допомогою ампер-вагів	Опосередковано за законом Ома $I = \frac{U_{\text{Дж}}}{R_x}; I = nK_{\text{Дж}}^{-1}mR_K^{-1}f_0 = \frac{1}{2}nme f_0$
Вольт	Нормальні елементи	Ефект Джозефсона $U_{\text{Дж}} = n \frac{h}{2e} f_0$
Ом	Розрахунковий конденсатор і міст-компаратор	Квантовий ефект Холла $R_x = \frac{h}{me^2}$
Тесла	Через струм і розрахункову котушку	Ефект ядерного магнітного резонансу $B = \frac{2\pi f_{\text{ЯМР}}}{\gamma_p}$
Фарада	Розрахунковий конденсатор	За допомогою моста-компаратора $C = \frac{K_M}{R_x \omega_e}$
Генрі	Розрахункова котушка	$L = \frac{R_x}{\omega_e} K_M$

## Висновки

Як видно з наведеної таблиці, відтворення електричних одиниць у межах існуючої SI проводилися через механічні величини і розрахункові методи, в той час як практична система і New SI відкривають шлях квантовим методам і простежуваності до ФФС. Це дає право зробити такі висновки.

1. Нова система еталонів базується на ФФС і забезпечує на 2–3 порядки більшу точність відтворення електричних одиниць у порівнянні з системою, що ґрунтується на механічних вимірюваннях.

2. Апаратура, що ґрунтується на квантових ефектах, не потребує постійного підстроювання та атестації для реалізації найвищої точності, що необхідно для еталонів системи SI. Результат об'єктивно фіксується, наприклад, за квантуванням ВАХ структури Джозефсона. Така апаратура менш чутлива до умов реалізації, має більш високі експлуатаційні характеристики.

3. Носієм точності є не апаратура, її прецизійність і стабільність, а сама фізика процесу і ФФС, що відкриває шлях до спрощення звірень, децентралізації системи забезпечення єдності вимірювань.

4. Квантові ефекти і еталони використовують високотехнологічні процеси і структури (надпровідність, криогенну техніку, квантові мікроструктури). І хоча вони більш складні у виготовленні, але забезпечують довгочасову стабільність, відтворюваність і надійність, що значно здешевлює і спрощує систему забезпечення єдності вимірювань.

5. New SI ліквідує дуалізм, який склався в електричних вимірюваннях, коли паралельно існують одиниці SI і “практичні” одиниці, що дуже важливо для метрології і науки в цілому.

6. Названі властивості нової системи свідчать про її безумовну перевагу над системою, яка ґрунтується на механічних вимірюваннях, що вже привело до її практичного застосування. Подальшими кроками мають стати офіційне введення в дію нових визначень і New SI.

## Список літератури

- XXIV CGPM. Resolution 1. – Paris, 2011.
- Кононогов С.А. Метрологические основы электрических измерений / С.А. Кононогов, И.Я. Краснополин, С.Г. Семенчинский // Метрология. – 2006. – № 5. – С. 5–51.
- Lampard D.G. // Proc. IEEE Monograph 216M. – 1957. – 271. – 104 p.
- 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.
- Purcell E.M., Torrey H.C., Pound R.V. // Phys. Rev. Mod. Phys. – 1946. – V. 18. – P. 323.
- Bloch, Hansen, Packard // Phys. Rev. – 1946. – V. 69 – P. 127.
- Ягола Г.К. Определение точного значения гиромагнитного отношения протона в сильных магнитных полях / Г.К. Ягола, В.И. Зингерман, В.Н. Сенетьгій // Измерительная техника. – 1966. – № 7. – С. 44–47.
- Josephson B. // Phys. Lett. – 1962. – V. 1. – P. 251.
- Popel R. The Josephson Effect and Voltage Standards / R. Popel // Metrologia-1992. – V. 29. – P. 153–174.
- Klitzing K. The Quantum Hall effect / K. Klitzing, G. Ebert // Physica 117 B & 118 B. – 1983. – P. 682–687.
- 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.
- Державний спеціальний еталон одиниці магнітної індукції / В.І. Зінгерман, Я.А. Зільберштейн, О.Ю. Багалій, В.Б. Кондратюк // Український метрологічний журнал. – 1996. – Вип. 2–3. – С. 36–40.
- Новий державний еталон одиниці електрорушійної сили та сталої напруги / В.В. Анікін, Ю.Ф. Павленко, О.І. Колбасін [та ін.] // Там само. – 2007. – № 2. – С. 21–26; 2007. – № 3. – С. 8–12; 2007. – № 4. – С. 11–14.
- Likharev K., Zorin A. // J. Low Temp. Phys. – 1985. – V. 59. – P. 347.
- Реформа SI і її вплив на систему відтворення електричних одиниць / П.І. Несажмаков, Ю.Ф. Павленко, Н.М. Маслова, В.В. Анікін [Електронний ресурс] // Метрологія та вимірювальна техніка: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія-2012”, 9–11 жовтня 2012 р., м. Харків: наук. праці. – Електрон. дан. – Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2012. – С. 188–193. – 1 CD-ROM.
- Катков А.С. Государственный первичный эталон единицы силы постоянного тока / А.С. Катков, И.В. Короткова, О.М. Павлов // Измерительная техника. – 1995. – № 1. – С. 3–4.
- Proceedings of the 22<sup>nd</sup> general conference on weights and measures. – Paris, 2003. – P. 314.
- Fujii K. et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2005. – V. 54. – P. 854.
- Steiner R.L. et al. // Ibid. – 2005. – V. 54. – P. 846.
- Ivanchik A., Petitjean P., Rodriguez E., Varshavich D. // Astrophysics and space science. – 2003. – V. 283. – P. 583.
- Кротков И.Н. Точные измерения электрических емкости и индуктивности / И.Н. Кротков. – М.: Изд-во стандартов, 1966. – 272 с.
- Гурьянов В.С., Сурду М.Н., Салюк В.П. // Техническая электродинамика. – 1991. – № 3. – С. 108.
- 100 years of superconductivity / ed. by H. Rogalla, P.H. Kees. Chapter 9: Quantum metrology / ed. by R.E. Harris, J. Niemeyer. P. 515–557. – (Taylor and Francis group 2012, ISBN 978-1-4398-4946-0).
- Hamilton C.A. Josephson D/A converter with fundamental accuracy / C.A. Hamilton, C.J. Burroughs,

- R.L. Kautz // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1995. – 44:223-5.  
25. Monaco R. Enhanced AC Josephson effect / R. Monaco // J. Appl. Phys. – 1990. – 68. – P. 679–687.  
26. Present status of AC Josephson voltage metrology at PTB / J. Niemeyer, O. Kieler, F. Müller

[et al.] [Електронний ресурс] // Метрологія та вимірювальна техніка: VIII Міжнар. наук.-техн. конф. “Метрологія–2012”, 9–11 жовтня 2012 р., Харків: наук. праці: в 2 т. Т. 1. – Електрон. дан. – Харків, ННЦ “Інститут метрології”, 2012. – С. 12–15. – 1 CD-ROM.

УДК 621.317.7

## МЕТОДОЛОГІЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ В ПІДСИСТЕМІ МЕТРОЛОГІЧНОЇ САМОПЕРЕВІРКИ АЦП

Р.В.Кочан, кандидат технічних наук, доцент Національного університету “Львівська політехніка”



*Описано метод формування тестових сигналів для визначення інтегральної нелінійності АЦП у тестовій точці за допомогою вимірювального перетворювача на базі багаторезисторного подільника напруги з усередненням спадів напруги*

*на всіх резисторах. Доведено, що такий перетворювач є нечутливим до опорів та систематичних похибок резисторів. Проаналізовано похибку визначення нелінійності АЦП, зумовлену зміною кривизни функції перетворення в околі тестової точки. Запропоновано метод збільшення кількості тестових точок – “базовий” метод та методологію побудови методів формування тестових точок, що забезпечують більш рівномірний їх розподіл за діапазоном.*

*It was presented the method of testing signal generation for ADC's integral nonlinearity identification in testing point using measuring converter based on multi-resistors voltage divider with averaging voltages of all resistors. It was proved that such converter is insensitive to resistances and systematic errors of the resistors. It was analyzed the error of ADC's nonlinearity identification caused by changing the curvature of ADC's conversion function in the neighborhood of testing point. It was proposed method of testing point incrementing as “basic” method and methodology of development methods of testing point generation, which provides more evenly distribution of testing points via the range in comparison with “basic” method.*

### Вступ

Розвиток технологій мікроелектроніки привів до широкого використання методів цифрового опрацювання даних у вимірювальних системах (ВС) [1]. Їхніми необхідними компонентами є аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що виготовляються пере-

важно у вигляді інтегральної схеми або компонента системи на кристалі. Постійне збільшення кількості ВС різного функціонального призначення веде до того, що збільшується і кількість АЦП, що підлягають державному метрологічному контролю [2]. Ключова вимога цього контролю – єдність результатів вимірювань, яка забезпечується організаційно-технічними засобами, зокрема, періодичними повірками. Але широкомасштабне виробництво та використання АЦП, що вимагають повірки, зважаючи на її високу трудомісткість та обмежені ресурси уповноважених метрологічних лабораторій, вступає у протиріччя з вимогою забезпечення єдності результатів вимірювань. Слід відзначити, що це протиріччя існувало завжди, однак експлуатація відносно невеликої кількості АЦП та їхня концентрація на великих підприємствах полегшували його вирішення. На сьогодні це неактуально і цілі групи АЦП (наприклад, АЦП, що входять до складу ВС автомобілів) випадають із поля зору державної метрологічної служби, що потенційно призводить до втрати єдності вимірювань. Особливо це актуально для прецизійних АЦП.

Метою роботи є аналіз методів та засобів, які забезпечують ефективну повірку прецизійних АЦП, що працюють із сигналами електричної напруги.

### 1. Відомі методи забезпечення єдності результатів аналого-цифрового перетворення

Під час експлуатації АЦП єдність їхніх результатів перетворення забезпечується шляхом проведення періодичних повірок, процедуру яких строго регламентовано нормативними документами [2, 3]. У них визначено засоби вимірювальної техніки, зокрема АЦП, що повинні проходити повірку в уповноважених метрологічних лабораторіях. Метою повірки є встановлення придатності засобів вимірювальної техніки до застосування шляхом визначення їхніх дійсних похибок і порівняння останніх з допустимими межами. Вимоги до повірки власне АЦП регламентуються у [4–8], де всі АЦП поділяються на дві групи: