

П. І. Неєжмаков, Ю. Ф. Павленко, Ю. Ю. Буняєва

ННЦ "Інститут метрології", Харків, Україна

МІЖНАРОДНІ ПРОГРАМИ З МЕТРОЛОГІЇ: АНАЛІЗ І ВИСНОВКИ

The paper presents the results of analysis of international documents on metrology and European Metrological Programs (EMRP, EMPiR), that are the part of the European Research and Innovation Program "Horizon 2020" and allow to address the question "what is the direction of the world metrology?"

Ключевые слова: *Європейські програми з метрології, EMRP, EMPiR, Міжнародна система одиниць, SI, простежуваність, фундаментальні фізичні сталі.*

Автори висловлюють щире подяку співробітництву ННЦ "Інститут метрології" Н. О. Волошиній за кваліфікований переклад Європейських програм та міжнародних документів з метрології та допомогу в їх редагуванні.

Вступ

Аналіз Європейських програм з метрології, а також інших міжнародних документів, перш за все Консультативних комітетів (СС), Міжнародного комітету мір та ваг (СІРМ), дає можливість сформулювати основні напрямки розвитку сучасної метрології, оцінити потенціал та місце ННЦ "Інститут метрології" в цьому процесі.

Для проведення аналізу використовувались такі документи:

1. Дослідницькі програми Європейської асоціації національних метрологічних інститутів (EURAMET) з метрології (EMRP, EMPiR) [1–4].

2. Документ стратегічного планування Консультативного комітету з електрики та магнетизму (ССЕМ) "Великі проблеми в електромагнетизмі" [5].

3. "Mise en pratique" (практичні рекомендації) за видами вимірювань [6].

4. Reports (звіти) Президентів Консультативних комітетів за видами вимірювань [7, 8].

Враховуючи, що одним з найважливіших моментів подальшого розвитку є оголошена на 24-й Генеральній Конференції з мір та ваг (CGPM) у 2011 р. реформа Міжнародної системи одиниць SI (New SI) і перевизначення чотирьох основних одиниць (кілограма, ампера, кельвіна, моля), було вирішено поділити міжнародні програми і роботи на такі 3 групи:

1) роботи за видами вимірювань, в яких має місце перевизначення одиниць (маса і пов'язані з нею величини, електричні та температурні вимірювання);

2) роботи і програми за видами вимірювань, яких перевизначення, оголошені на 24-й CGPM, не стосуються;

3) нові і перспективні проблеми в метрології.

1. Проекти і роботи групи 1

Наведемо основні відомості про оголошену реформу системи SI і ключові моменти New SI. Ось витяг (цитата) з Резолюції 24 CGPM 2011 р.:

Міжнародна система одиниць SI буде системою одиниць, в якій

– частота переходу, пов'язаного з надтонким розщепленням основного стану атома цезію-133, $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{СТР}} = 9192631770 \text{ Гц}$ точно;

– швидкість світла в вакуумі $c_0 = 299792458 \text{ м/с}$ точно;

– стала Планка $h = 6,62606 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ точно;

– елементарний заряд $e = 1,602117 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ точно;

– стала Больцмана $k = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$ точно;

– стала Авогадро $N_A = 6,02214 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ точно;

– спектральна сила світлового потоку монохроматичного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ $K(\lambda_{555}) = 683 \text{ лм/Вт}$ точно.

Символ X в цьому проекті резолюції є однією або декількома додатковими цифрами, які потрібно додати до числових значень h , e , k і N_A , з використанням значень, заснованих на найостаннішому корегуванні CODATA.

Звідси витікає, що в SI залишаться діючий набір семи основних одиниць, зокрема:

– **кілограм** залишиться одиницею маси, але його розмір буде встановлено фіксуванням чисельного значення сталої Планка;

– **ампер** залишиться одиницею електричного струму, але його розмір буде встановлено фіксуванням чисельного значення елементарного заряду;

– **кельвін** залишиться одиницею термодинамічної температури, але його розмір буде встановлено фіксуванням чисельного значення сталої Больцмана;

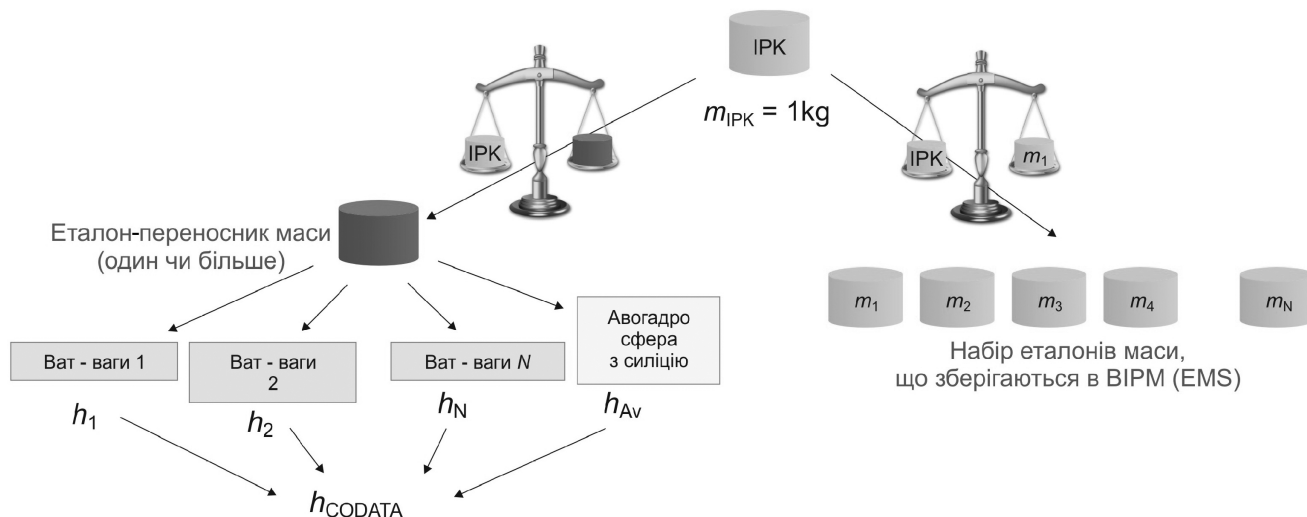


Рис. 1. Простежуваність "природних" еталонів кілограма до ІРК

— *моль залишиться одиницею кількості речовини, яка визначається числом структурних елементів, але його розмір буде встановлено фіксуванням числа Авогадро.*

Підкреслимо ключові моменти цього рішення:

— всі основні одиниці встановлюються у неявному вигляді, через фіксацію відповідних фізичних сталей;

— розміри одиниць у порівнянні з діючою SI залишаються незмінними;

— суттєво змінюються визначення кілограма, ампера, кельвіна і моля, що веде до зміни методології їх відтворення і передавання;

— запланований термін введення New SI в дію — 2018 р.

Найбільш відповідальним моментом реалізації реформи SI є впровадження нового визначення кілограма, цій проблемі присвячено дослідницькі програми EMRP SIB03, SIB05 та SRT-s11, відповідна *Mise en pratique* [9, 10], а також ряд інших документів.

В цих програмах підкреслюється значення досліджень із узгодження (на рівні не гірше $2 \cdot 10^{-8}$) діючого міжнародного еталона маси — платино-іридієвого прототипу (ІРК), "електричного" кілограма, що простежується до сталої Планка h , і "атомного" кілограма, простежуваного до сталої Авогадро (рис. 1).

Другим важливим завданням є забезпечення розповсюдження нового визначення кілограма, яке б забезпечило незмінність, відсутність "стрибків" і неузгодженостей в галузі вимірювань маси і пов'язаних з нею величин.

Ще одна програма передбачає дослідження природних кремнієвих сфер, які значно дешевше спеціально вирощуваних еталонних монокристалічних сфер з ізотопу кремнію ^{28}Si і можуть зайняти своє місце в новій системі забезпечення єдності вимірювання маси.

Щодо перевизначення **моля** — в *Mise en pratique* визначення моля проаналізовано це питання і по-

казано, що воно не впливає на якісь аспекти практичної метрології.

Другою основною одиницею, яка перевизначається в New SI, є **ампер**. Парадокс, який виник сьогодні, полягає в тому, що існуюче на цей час в SI визначення ампера [11] через механічні величини і зафіксоване значення магнітної сталої μ_0 — давно не діє на практиці. Як відомо, Міжнародне бюро мір та ваг (ВІРМ) рекомендувало з 1990 р. використовувати для відтворення одиниць постійної напруги (вольта) і електричного опору (ома) квантові ефекти Джозефсона і Холла, що принципово змінило методологію відтворення всіх електричних величин та їх одиниць. На сьогодні квантові методи вимірювань і пов'язані з ними нанотехнології глибоко проникли в метрологію і стали основою методології відтворення одиниць в електричних та магнітних вимірюваннях. Подальшому розвитку квантових і нанотехнологій присвячено 4 проекти EURAMET (SIB07, SRT-s02, SRT-s04, SRT-s05), а також ряд міжнародних документів. При цьому основними напрямками розвитку цих технологій є:

- створення вимірювачів змінного струму на ефекті Джозефсона;
- реалізація квантового ефекту Холла на змінному струмі з метою розширення функціональних можливостей;
- реалізація одноелектронної технології (ефекту одноелектронного тунелювання) і створення на її основі квантового еталона ампера;
- створення безгелієвих охолоджувачів для досягнення надпровідного стану;
- удосконалення технологій виготовлення квантових наноструктур;
- впровадження нових матеріалів (графен, нанотрубки).

Головні цілі, які ставляться в програмах: підвищення метрологічних можливостей квантових методів вимірювання, а також більша доступність їх для практичної метрології.

Реалізації перевизначення **кельвіна** (через сталу Большмана замість потрібної точки води) присвячено проекти SIB01 та SRT-s14. Також кілька проектів передбачають підвищення простежуваності передавання температури на основі новітніх технологій (SIB10, SRT-s17), а також розвиток високо-температурної метрології.

2. Проекти і документи групи 2

Хоча в напрямку просторово-часових вимірювань визначення секунди і метра не змінюються, в проектах EURAMET з метрології заплановано проведення чи не найбільшого числа проектів — 11. Основні роботи, які фігурують в цих проектах, це створення стандартів часу-частоти в оптичному діапазоні з очікуваною невизначеністю $\sim 10^{-18}$ (SIB04, SRT-s16), оптичних мереж передавання часо-частотної інформації (SIB02, SRT-s15, SRT-r05), а також створення нового покоління стандартів частоти для промисловості (IND14).

В оптичних і оптико-фізичних вимірюваннях значне місце займають проекти і документи з підготовки до квантового визначення кандели (в термінах фотонних одиниць) на основі однофотонних технологій (проекти SRT-s12, SRT-s13, документ [5]). Також необхідно відзначити проект SRT-s13 стосовно метрологічної підтримки впровадження в широку практику твердотільних освітлювальних виробів на діодах (LED-світильників), а також проект SRT-s02 щодо вимірювання параметрів лінз.

3. Нові і перспективні проблеми в метрології

Аналіз програм EMRP та EMPiR і, особливо, документа [5] дозволяє сформулювати нові і перспективні проблеми в метрології. Окрім вже названих нами “одноелектроніки” та “одnofотоніки” (в широкому розумінні цих термінів, а не тільки створення еталона ампера і еталона кандели), до таких проблем відносяться:

нанобіоелектроніка: аналіз ДНК та інших ланцюгових молекул, контроль клітинного мікросередовища, біотехнологічні обчислення, швидкісна обробка інформації;

молекулярна електроніка: одномолекулярні і внутрішньомолекулярні вимірювання, еталонні одномолекулярні плівки на основі самозбірок тощо;

нанорозмірна НВЧ-метрологія та спінтроніка;

наномагнетизм: магнітно-силова та сканувальна-тунельна мікроскопія, простежуваність в нанотехнологіях;

квантові обчислення (квантові біти — кубіти): високошвидкісні комунікації та обчислювальні системи, їх метрологічне забезпечення;

терагерцева метрологія: ультрашвидкі бездротові комунікації і зондування, спектроскопія; підкресле-

но, що метрологія (ЗВТ) для таких частот повністю відсутня (SRT-s06);

тривімірна нанометрологія і простежувана субнанометрологія: констатується, що метрологія цих галузей в початковому стані (SRT-s08).

4. Прогноз подальшого розвитку метрології

Проведений аналіз дозволяє зробити деякі прогнози щодо подальшого розвитку метрології.

Перш за все відзначимо, що через 10 років в методології відтворення одиниць будуть домінувати квантові і нанотехнології. Вже сьогодні вони використовуються для:

- відтворення одиниць часу, частоти і довжини;
- відтворення одиниці електричної напруги — вольт на постійному і змінному струмі;
- відтворення одиниці сили струму — ампера;
- участі у створенні природного (електричного) еталона кілограма;
- вимірювання напруги “шуму Джонсона” у шумовій термометрії;
- відтворення одиниці сили світла — кандели;
- відтворення одиниці потужності на промисловій частоті (50, 60 Гц);
- створення комерційного квантового вольтметра постійного і змінного струму і ряду інших приладів.

В окремих галузях вимірювання прогнозується такий стан розвитку метрології через 10–15 років:

Простір і час:

- секунда визначається через частоту квантового явища в оптичному діапазоні частот, невизначеність реалізації складає $u \sim 1 \cdot 10^{-18}$;
- метр визначається через швидкість світла, невизначеність реалізації складає $u \sim 1 \cdot 10^{-14}$;
- досягнуто необхідний рівень простежуваності в нанометрії;

Маса та пов’язані з нею величини:

- кілограм визначається через сталу Планка, невизначеність складає $(1 \sim 2) \cdot 10^{-9}$.

Електричні вимірювання:

- ампер реалізовано на базі методу одноелектронного тунелювання, невизначеність складає 10^{-8} ;
- вольт і Ом реалізовано на квантових ефектах Джозефсона і Холла, замкнута “квантовий трикутник”;
- реалізовано вимірювання параметрів змінного струму (на частоті до 1 МГц) на базі ефекту Джозефсона з невизначеністю 10^{-6} ;
- одиниці параметрів електричних кіл — ома, фарада, генрі- відтворюються на базі квантового ефекту Холла на змінному струмі;
- удосконалено технології реалізації квантових ефектів, що зробило їх доступними для створення комерційних засобів вимірювальної техніки з принципово новими метрологічними характеристиками.

Таблиця 1. Потенціал ННЦ “Інститут метрології”

Види вимірювань	Потенціал
Електромагнітні вимірювання	Квантовий еталон одиниці напруги — вольт (ефект Джозефсона) Квантовий еталон одиниці опору — ома (квантовий ефект Холла) Квантовий еталон одиниці магнітної індукції — тесла (ефект ядерного магнітного резонансу) НВЧ-технології (до 178 ГГц)
Простір—час (частотно-часові та лінійно-кутові вимірювання)	Квантові еталони одиниць секунди і метра Лазерні технології Нанотехнології
Маса та пов’язані з нею величини	Еталон одиниці маси — кілограма, впровадження природного еталона кілограма
Теплові вимірювання	Еталони одиниці температури — кельвіна за шкалою МТШ-90 Кріогенний радіометр
Фотометрія та радіометрія	Еталони одиниці сили світла — кандели і світового потоку — люмена Еталони одиниць оптичних величин Однофотонні технології

Температурні і теплові вимірювання:

- кельвін визначається через сталу Больцмана;
- зріс рівень і доступність первинної термометрії, шкала МТШ-90 поступово втрачає своє значення єдиної опори температурних вимірювань;
- еталони МТШ-90 стали вторинними.

Радіометрія і фотометрія:

- досягнуто значні успіхи в однофотонних технологіях;
- фотометричні одиниці визначаються в термінах квантових одиниць і простежуються до сталої Планка;
- кріогенний радіометр зберігає своє значення метрологічного базису оптико-фізичних вимірювань.

5. Потенціал ННЦ “Інститут метрології”

З одержанням незалежності (1991 р.) Україні довелося створювати свою еталонну базу майже з нуля. При цьому з самого початку цієї роботи, незважаючи на недостатність коштів, було взято курс на побудову сучасних еталонів з використанням квантових методів і технологій. Ця технічна політика себе повністю виправдала. Сьогодні, якщо говорити про домінування квантових і нанотехнологій, в ННЦ “Інститут метрології” створено основні квантові еталони та ряд інших, які відповідають сучасним вимогам (таблиця 1). Безумовно, невирішених проблем багато, але прийнятий курс на використання новітніх досягнень залишається незмінною філософією ННЦ “Інститут метрології”.

Список літератури

- [1] <http://www.euramet.org/research-innovation/emrp/>.
- [2] <http://www.euramet.org/research-innovation/research-empir/>.
- [3] Аналіз тематики спільних науково-дослідних проектів, що виконувалися у рамках EMRP за напрямками: Метрологія для промисловості, Поширення одиниць SI та Метрологія для енергетики // Інформаційний бюлетень з міжнародної метрології.— ННЦ Інститут метрології.— 2014.— № 2. С. 65–74.
- [4] Дослідження напрямків спільних науково-дослідних проектів у рамках EMPIR // Інформаційний бюлетень з міжнародної метрології.— ННЦ Інститут метрології.— 2015.— № 1. С. 42–65.
- [5] <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCEM/CCEM-WGSP-2011.pdf>.
- [6] <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/>.
- [7] <http://www.bipm.org/en/cgpm-2014/reports-presidents.html>.
- [8] Звіти Президентів Консультативних комітетів Міжнародного бюро мір та ваг // Інформаційний бюлетень з міжнародної метрології.— ННЦ Інститут метрології.— 2014.— № 2. С. 9–59.
- [9] http://www.bipm.org/cc/CCM/Allowed/15/02A_MeP_kg_141022_v-9.0_clean.pdf.
- [10] Mise en pratique для визначення кілограма // Інформаційний бюлетень з міжнародної метрології.— ННЦ Інститут метрології.— 2015.— № 1. С. 33–41.
- [11] <http://www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/26/CCEM-09-05.pdf>.