



УДК 006.91.099(100)

КУДИ ЙДЕ СВІТОВА МЕТРОЛОГІЯ? (за результатами аналізу європейських програм і документів)

- П.І. Неєжмаков**, доктор технічних наук, доцент, генеральний директор ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків
Ю. Ф. Павленко, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків
Ю.Ю. Буняєва, начальник лабораторії ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків



П.І. Неєжмаков



Ю. Ф. Павленко



Ю.Ю. Буняєва

Наведено аналіз міжнародних документів з метрології та європейських метрологічних програм (EMRP, EMPiR), які є частиною Європейської дослідницько-інноваційної програми “Горизонт 2020”, що значною мірою дозволяє відповісти на питання: “Куди йде світова метрологія?”.

The article provides the analysis of the international documents on metrology and the European Metrology Programmes (EMRP, EMPiR), which are the part of the European Research and Innovation Programme Horizon 2020, that allows to substantially answer the question “what is the direction of the world metrology?”.

Вступ

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

Для проведення аналізу використовувалися 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 CSEM “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].

З урахуванням того, що одним із найважливіших моментів подальшого розвитку є оголошені на 24-й Генеральній конференції з мір та ваг (CGPM) у 2011 р. реформа Міжнародної системи одиниць SI (New SI) та 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 не торкнулися перевизначення, оголошені на 24-й CGPM (просторово-часові та оптичні вимірювання);

3) нові та перспективні проблеми в метрології, головним чином, в *нанометрології*.

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, $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{СТР}} = 9192631770$ Гц точно;

• швидкість світла у вакуумі $c_0 = 299792458$ м/с точно;

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

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

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

• стала Авогадро $N_A = 6,02214 \times 10^{23}$ моль⁻¹ точно;

• спектральна сила світлового потоку монохроматичного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц $K(\lambda_{559}) = 683$ лм/Вт точно.

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

Звідси витікає, що в SI залишиться діючий набір із 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;

• **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 неясному вигляді, через фіксацію відповідних фундаментальних фізичних сталих (ФФС);

• 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, EMPIR SIB03, SIB05 та SRT-s11, відповідну *Mise en pratique* [9, 10], а також низку інших документів.

Багато років провідні метрологічні інститути світу ведуть пошук методів відтворення природного кілограма. На сьогодні, згідно з рішеннями 24-ї та 25-ї CGPM, як основний обрано метод визначення кілограма через сталу Планка, що передбачає порівняння механічної потужності (куди входить маса) з електричною, параметри якої (напруга та струм) можуть бути визначені за допомогою квантових

ефектів, які, у свою чергу, спираються на сталу Планка. Цей метод одержав назву “методу ват-вагів” або “електричного кілограма”.

Альтернативним методом є визначення кілограма через сталу Авогадро та використання для його відтворення “ідеальної” кремнієвої кулі (метод “атомного кілограма”). Розглянемо їх докладніше.

Для реалізації методу визначення кілограма через сталу Планка у Національній фізичній лабораторії Великої Британії у 1975 р. д-ром Брайоном Кібблом (Bryan Kibble) було розроблено унікальну установку [9], яка одержала назву ват-ваги.

У ході двоетапного експерименту на цих вагах порівнюються механічна та електрична потужності (віртуальні), а також вимірюються величини, що входять до рівняння вимірювань: швидкість V руху рамки зі струмом (за допомогою лазерного інтерферометра), прискорення вільного падіння g (за допомогою абсолютного гравіметра), електрична напруга U (ефект Джозефсона) і електричний опір R (квантовий ефект Холла).

Як показано нижче, маса в цьому методі визначається за виразом

$$m = h \frac{f_1 f_2}{vg} C_{el}, \quad (1)$$

де h — стала Планка; f_1 і f_2 — дві вимірних частоти при двох експериментах з використанням ефекту Джозефсона; C_{el} — безрозмірний коефіцієнт (стала ват-вагів).

Таким чином, у методі ват-вагів використовуються квантові ефекти Джозефсона і Холла, які, у свою чергу, спираються на сталі Планка h і елементарний заряд e . Елементарний заряд у виразі (1) скорочується і залишається стала Планка, тому цей метод має назву простежуваності до сталої Планка [6] або “електричного кілограма”.

Відтворення кілограма через сталу Авогадро спрощено можна пояснити таким чином.

Число Авогадро N_A — кількість атомів, яка міститься в 0,012 кг ізотопу вуглецю ¹²C. Якщо 0,012 кг містить N_A атомів, то в 1 кг повинно міститися X атомів, що дорівнює

$$X = \frac{N_A}{0,012} = \frac{1000 N_A}{12} = \frac{1000 \cdot 6,0221415 \cdot 10^{23}}{12} = 5,01845166 \cdot 10^{25}.$$

Для вирішення цього завдання використовуються спеціально вирощені кристали кремнію надвисокої чистоти і бездефектної структури у вигляді кулі масою близько 1 кг. Для підрахунку атомів у цій кулі застосовується метод з використанням рентгенівської і оптичної інтерферометрії, який одержав назву **XRCD-методу** [10, 11].

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

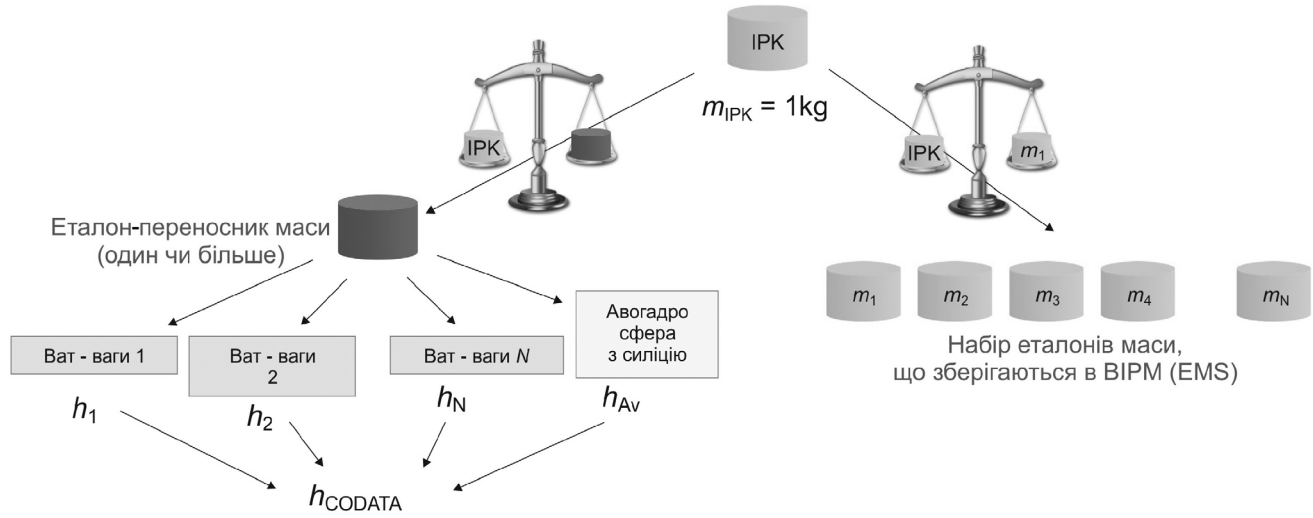


Рис. 1. Простежуваність "природних" еталонів кілограма до ІРК

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

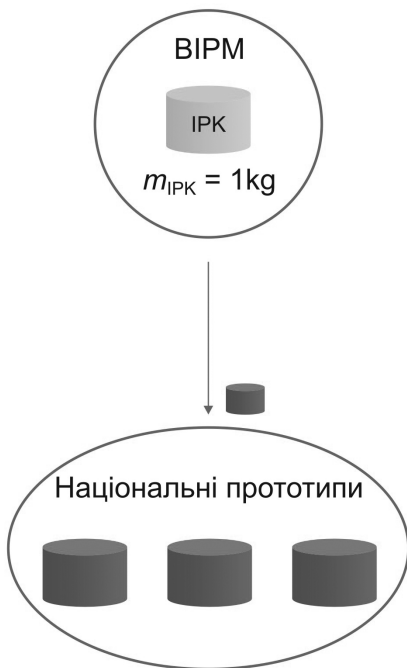
Процедура розповсюдження кілограма до і після перевизначення ілюструється на рис. 2.

Для вирішення проблеми розповсюдження нового визначення кілограма і відпрацювання відповідної методики в Міжнародному бюро мір та ваг (ВІРМ) створено спеціальну лабораторію, в якій зібрано "банк вихідних еталонів".

До цієї сукупності входять 12 вихідних еталонів + 4 комплекти із чотирьох гир кожний, зокрема:

- комплект 1: 4 платино-іридієвих циліндри по 1 кг;
- комплект 2: 4 циліндри з неіржавкої сталі по 1 кг;
- комплект 3: 4 сфери з природного кремнію по 1 кг;
- комплект 4: 1 платино-іридієва гиря + 1 кремнієва гиря + 2 гири з неіржавкої сталі, кожна гиря масою 1 кг, але з різним об'ємом.

ДО ПЕРЕВИЗНАЧЕННЯ



ПІСЛЯ ПЕРЕВИЗНАЧЕННЯ

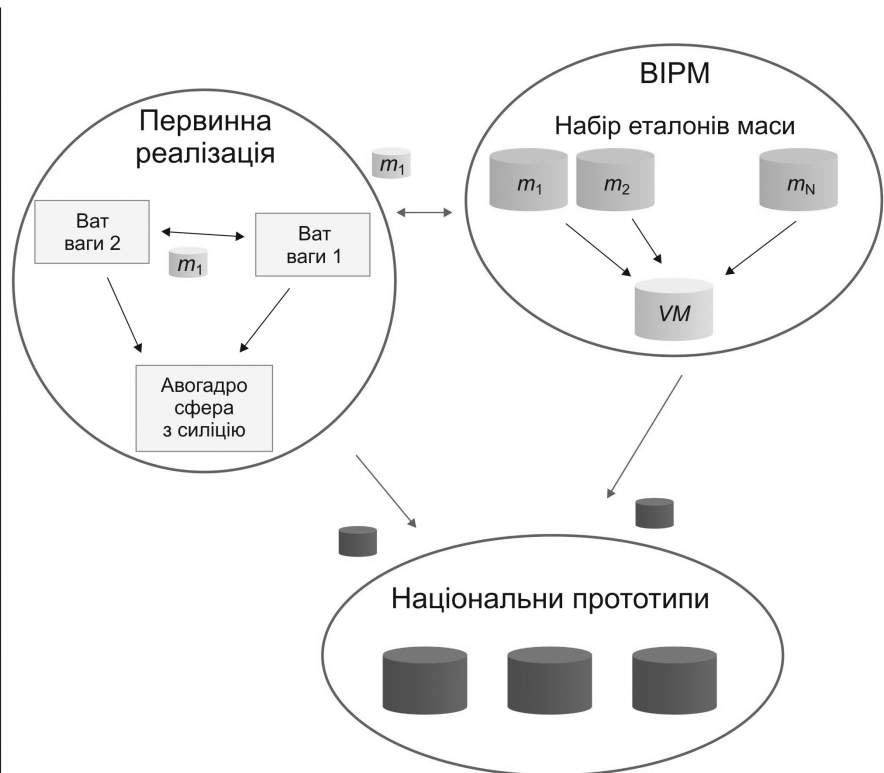


Рис. 2. Схеми розповсюдження кілограма

Процедура дослідження різних еталонів маси включає:

1) порівняння стабільної маси еталонів із різних матеріалів;

2) вимірювання маси в різних середовищах зберігання: газоподібному аргону, газоподібному азоту, вакуумі, повітрі;

3) порівняння стабільності маси за різних умов зберігання для сфер із природного кремнію і платино-іридієвих гир.

У ВІРМ для цього створено спеціально обладнану лабораторію, яка містить генератори азоту, балони з аргонем, аналізатори кисню, вологості, вуглецю, хроматограф, а також контейнери для зберігання еталонів маси.

Ще одна програма передбачає дослідження так званих “квазіпервинних” сфер, виготовлених із природного кремнію, які більше ніж в 10 разів дешевше спеціально виготовлених первинних монокристалічних сфер з ізотопу кремнію ^{28}Si і можуть зайняти своє місце в новій системі забезпечення єдності вимірювань маси. Треба відзначити, що вартість сфер, виготовлених із природного кремнію все одно буде більше в 2 рази, ніж кілограмового національного прототипу, виготовленого із платино-іридієвого сплаву.

Щодо перевизначення *моля*: в *Mise en pratique* це питання проаналізовано і показано, що воно не впливає на будь-які аспекти практичної метрології.

Другою основною одиницею, яка перевизначається в New SI, є *ампер*. Парадокс, який виник сьогодні, полягає в тому, що існує на цей час в SI визначення ампера [12] через механічні величини і зафіксоване значення магнітної сталої μ_0 давно не діє на практиці. Як відомо, ВІРМ з 1990 р. для відтворення одиниць постійної напруги (вольта) і електричного опору (ома) рекомендувало використовувати *квантові ефекти Джозефсона і Холла*, що принципово змінило методологію відтворення всіх електричних величин та їх одиниць. Наразі *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 низку 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), створення на її основі квантового еталона ампера і замикання відомого “квантового трикутника” (рис. 3), тобто

незалежної реалізації базових електричних одиниць через квантові ефекти і ФФС;

- створення безгелієвих охолоджувачів для досягнення надпровідного стану;

- удосконалення технологій виготовлення квантових наноструктур;

- впровадження нових матеріалів (графену, нанотрубок).



Рис. 3. Квантовий трикутник електричної метрології

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

Слід відзначити, що наявність вищезазначених європейських проектів і міжнародних документів значною мірою стимулювали розвиток названих напрямків. Так, наразі вже розроблено методи та апаратуру відтворення *напруги змінного струму* на частотах до 100 кГц (на базі ефекту Джозефсона) з невизначеністю близько $1 \cdot 10^{-8}$, що є видатним досягненням, на цьому ефекті розроблено *комерційний вольтметр* постійного та змінного струму.

На сьогодні вже реалізовано квантовий ефект Холла *на змінному струмі*, що відкриває шлях до створення *єдиного еталона* параметрів електричних кіл (активного опору — ємності — індуктивності).

Активно і успішно продовжуються роботи з реалізації методу одноелектронного тунелювання та створення на його основі *квантового еталона ампера*. Усі ці досягнення дозволяють говорити про створення системи реалізації *всіх електричних одиниць* на основі ФФС з усіма позитивними властивостями такої системи.

Реалізації *перевизначення кельвіна* (через сталу Больцмана замість потрібної точки води) присвячено проекти SIB01 та SRT-s14.

У вищезазначених проектах та інших документах підкреслюється, що необхідною умовою цього перевизначення є розмірність похибок (невизначеностей), з якими відомі $T_{\text{птт}}$ і k (сьогодні $T_{\text{птт}}$ відома значно точніше). Для цього раніше було проведено міжнародний проект, який дозволив знизити невизначеність k до необхідного рівня (менше $1 \cdot 10^{-6}$).

Зазначимо, що методи вимірювання k — це ті ж методи первинної термометрії, які використовуються

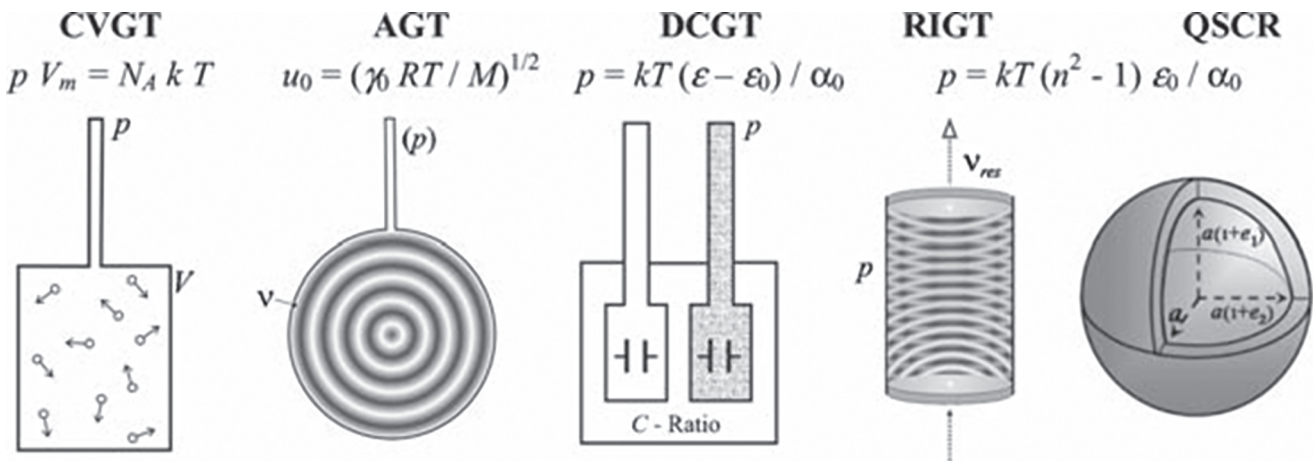


Рис. 4. Методи та апаратура первинної термометрії: CVGT — газовий термометр сталого об'єму; AGT — акустичний газовий термометр; DCGT — газовий термометр за діелектричною сталою; RIGT — газовий термометр за показником заломлення; QSCR — термометр на основі квазісферичного резонатора

для вимірювання термодинамічної температури (їх загальноприйняті позначення наведено на рис. 4), а їх подальші дослідження та вдосконалення, проведені при експериментах з уточнення k , сприяють поверненню вектора розвитку термометрії вищого рівня в бік первинних методів у порівнянні з практичними, які використовуються в концепції практичних шкал. І хоча шкала МТШ-90 ще довго буде залишатися в метрологічній практиці, майбутнє термометрії — в розвитку і впровадженні первинних методів.

Таким чином, перевизначення кельвіна через сталу Больцмана замість потрібної точки води приведе в перспективі до використання в еталонах методів первинної термометрії і термодинамічної шкали замість існуючої наразі системи реперних температурних точок (станів фазової рівноваги речовин) і практичної температурної шкали МТШ-90.

Також кілька проектів передбачають підвищення простежуваності передавання температури на основі новітніх технологій (SIB10, SRT-s17), а також розвиток високотемпературної метрології.

2. Проекти і документи групи 2

Хоча в напрямку просторово-часових вимірювань визначення секунди і метра не змінюються, у проектах EURAMET з метрології заплановано проведення чи не найбільшого числа проектів — 11. Основні роботи, які фігурують у цих проектах, — створення стандартів часу-частоти в оптичному ді-

апазоні (рис. 5) з очікуваною невизначеністю $\sim 10^{-18}$ (SIB04, SRT-s16), оптичних мереж передавання 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 посідають проекти і документи з підготовки до квантового визначення кандели (у термінах фотонних одиниць) на основі однофотонних технологій (проекти SRT-s12, SRT-s13, документ [5]).

“Квантова кандела” — міжнародний проект, який направлено на вирішення однієї з проблем фундаментальної метрології, а саме — перегляд основної одиниці SI — кандели — з точки зору числа фотонів (EMRP 2007).

Проект було складено у відповідь на заклик CIPM щодо перевизначення кандели в термінах числа фотонів, а не в оптичній потужності. Згідно з міжнародним документами “таке формулювання та зв’язок зі сталою Планка дозволять домогтися більшої узгодженості між визначеннями основних одиниць та краще обслуговувати нові галузі, такі як квантові технології, а також класичну радіометрію”.

Роботи продовжуються у рамках проектів SRT-s12, SRT-s13.

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 перспективні проблеми в метрології

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

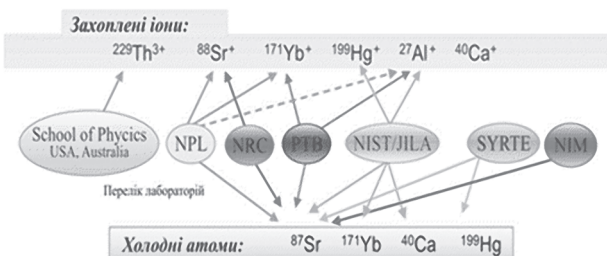


Рис. 5. Варіанти оптичного перевизначення секунди

- **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 самоскладання тощо;

- **нанорозмірна НВЧ-метрологія та спінтроніка;**

- **наномагнетизм:** магнітно-силова та сканувально-тунельна мікроскопія, простежуваність у нанотехнологіях;

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

- **терагерцова метрологія:** ультрашвидкі бездротові комунікації і зондування, спектроскопія; підкреслено, що метрологія (методи та засоби вимірювань) для таких частот повністю відсутня (SRT-s06);

- **тривимірною нанометрологія і простежування субнанометрологія:** констатується, що метрологія цих галузей в початковому стані (SRT-s08);

- **метрологія для адитивного виробництва:** потреба в подальшому розвитку неконтактних методів вимірювання та точного 3D моделювання.

Аналіз цих програм показує, що вони передбачають розвиток не тільки *фундаментальної метрології*, але й ряду галузей науки і техніки, які безпосередньо пов'язані з *людиною*, його здоров'ям, екологією, побутом, оточуючим середовищем, розвитком комунікацій, медичним і фармакологічним забезпеченням *на принципово новому рівні*.

4. Прогноз подальшого розвитку метрології

Проведений аналіз європейських програм і міжнародних документів дозволяє зробити деякі прогнози щодо подальшого розвитку метрології.

Перш за все відзначимо, що вже сьогодні в методології відтворення одиниць домінують *квантові методи*, *мікро-* і *нанотехнології*, які використовуються для: відтворення одиниць часу, частоти і довжини; відтворення одиниці електричних величин на постійному і змінному струмі;

створення природного (електричного) еталона кілограма;

вимірювання “шуму Джонсона” у шумовій термометрії;

відтворення одиниці сили світла — кандели;

створення комерційних квантових ЗВТ, а не тільки еталонних.

В окремих галузях вимірювання *прогнозується*, що завдяки розвитку метрології через 10–15 років буде досягнуто такого стану.

Простір та час:

- секунда визначається через частоту квантового явища в оптичному діапазоні частот, невизначеність реалізації становить $u \sim 1 \cdot 10^{-18}$;

- метр визначається через швидкість світла, невизначеність реалізації становить $u \sim 1 \cdot 10^{-14}$;

- досягнуто необхідного рівня простежуваності в нанометрії.

Маса та пов'язані з нею величини:

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

Електричні вимірювання:

- ампер реалізовано на базі методу одноелектронного тунелювання, невизначеність становить $u \sim 1 \cdot 10^{-8}$;

- вольт і ом реалізовано на квантових ефектах Джозефсона і Холла, замкнуто “квантовий трикутник”;

- реалізовано вимірювання параметрів змінного струму (на частоті до 1 МГц) на базі ефекту Джозефсона, з невизначеністю $u \sim 1 \cdot 10^{-6}$;

- одиниці параметрів електричних ккіл — ом, фарад, генрі — відтворюються на базі квантового ефекту Холла на змінному струмі;

- вдосконалено технології реалізації квантових ефектів, що зробило їх доступними для створення комерційних засобів вимірювальної техніки з принципово новими метрологічними характеристиками.

Температурні і теплові вимірювання:

- кельвін визначається через сталу Больцмана;

- зросли 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 значних успіхів в однофотонних технологіях;

- фотометричні одиниці визначаються в термінах квантових одиниць і простежуються до сталої Планка;

- криогенний 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 із самого початку цієї роботи, незважаючи на недостатність коштів, було взято курс на побудову сучасних еталонів із 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 низку інших, які відповідають сучасним вимогам (див. таблицю). Безумовно, невирішених проблем багато, але *прийнятий курс на використання новітніх досягнень залишається незмінною філософією ННЦ “Інститут метрології”*.

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 світлового потоку — люмена Еталони одиниць оптичних величин Однофотонні технології

Автори висловлюють щире подяку співробітниці ННЦ “Інститут метрології” Н.О. Волошиній за кваліфікований переклад європейських програм та міжнародних документів з метрології.

Список літератури

- <http://www.euramet.org/research-innovation/emrp/>.
- <http://www.euramet.org/research-innovation/research-empir/>.
- 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. — Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2014. — № 2. — С. 65–74.
- Дослідження напрямків спільних науково-дослідних проектів у рамках EMPIR // Там само. — 2015. — № 1. — С. 42–65.
- <http://www.bipm.org/utils/common/pdf/CC/CCEM/CCEM-WGSP-2011.pdf>.
- <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/>.
- <http://www.bipm.org/en/cgpm-2014/reports-presidents.html>.
- Звіти Президентів Консультативних комітетів Міжнародного бюро мір та ваг // Інформаційний бюлетень з міжнародної метрології. — Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2014. — № 2. — С. 9–59.
- Kibble B. P.* A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method. *Atomic Masses and Fundamental Constants. Vol. 5* / ed. J. H. Sanders and A. H. Wapstra. — New York: Plenum, 1976. — P. 545–551.
- http://www.bipm.org/cc/CCM/Allowed/15/02A_MeP_kg_141022_v-9.0_clean.pdf.
- Mise en pratique* для визначення кілограма // Інформаційний бюлетень з міжнародної метрології. — Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2015. — № 1. — С. 33–41.
- <http://www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/26/CCEM-09-05.pdf>.