

Ю.Ф. ПАВЛЕНКО, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХП»

К.В. ГОЛІКОВА, магістр НТУ «ХП»

ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ SI

В статті наведено перспективи подальшого вдосконалення Міжнародної системи одиниць, проект перевизначень ампера, кельвіна, моля, кілограма, секунди, метра, кандели через ФФС, а також шляхи створення природного еталона маси. Розглядаються наслідки перевизначення основних одиниць на подальший розвиток квантової метрології. Найважливішим наслідком нової системи буде позбавлення від останнього артефакту – прототипу кілограма і перехід на його природне визначення.

Ключові слова: одиниця, система SI, перевизначення, еталон, ФФС, кілограм, ампер, кельвін, моль, секунда, метр, кандела.

Одним із наріжних каменів існування і розвитку системи забезпечення єдності вимірювань є наявність загально визнаної системи одиниць та її вдосконалення. Хоча система SI існує багато років і показала свою життєвість, вона постійно змінюється і уточнюється. За останні 50 років змінилися визначення ряду основних одиниць (секунди, двічі – метра і кандели), періодично уточнюються міжнародна температурна шкала, спростовані додаткові одиниці (радіан та стерадіан) тощо. Основною тенденцією цих змін є наближення визначень одиниць до природних інваріантів і посилення зв'язку з фундаментальними фізичними сталими (ФФС).

На черзі нова суттєва зміна: у 2005 р. Міжнародний комітет з мір та ваг (МКМВ) прийняв рекомендацію щодо підготовчих заходів з перевизначення кілограма, ампера, кельвіна і моля таким чином, щоб ці одиниці були прив'язані до точно відомих значень ФФС. Основними передумовами такого перевизначення є наступні фактори.

При розробці визначення основної одиниці, як вже було сказано, дуже важливо пов'язати її з природним інваріантом. Серед інших властивостей основних одиниць повинна бути можливість їх практичної реалізації “в будь-якому місці, в будь-який час і з тією точністю, яку потребує суспільство”.

Сьогодні стан з системою SI такий, що із семи основних одиниць тільки секунда і метр напряму пов'язані з істинними інваріантами, оскільки секунда визначається через період, що відповідає частоті надтонкого переходу цезію-133, а метр – через швидкість світла у вакуумі. Можна також вважати канделу прив'язаною до природного інваріанту – спектральній силі світлового потоку монохроматичного випромінювання на частоті максимальної чутливості людського ока ($540 \cdot 10^{12}$ Гц), що дорівнює точно 683 лм/Вт. Кельвін

визначається на основі точно заданого термодинамічного стану води (потрійна точка), яке хоч і є природним інваріантом, але має термодинамічну температуру, значною мірою залежну від вмісту домішок та ізотопного складу даного об'єму води. Це ускладнює ситуацію і обмежує точність, з якою це визначення може бути реалізовано [1].

Визначення інших основних одиниць мають ще більш серйозні недоліки. Кілограм досі визначається за допомогою «артефакту» – прототипу, прийнятого 1-ю Генеральною конференцією з мір та ваг (ГКМВ) у 1889 р. Його маса, як відомо, дрейфує по відношенню до істинного інваріанту, однак цей дрейф фактично неможливо оцінити, оскільки всі зразки цієї гири були відлиті з одного сплаву в одній плавці і на одному підприємстві, тобто дрейфують «в одному напрямку». Недоліки визначення ампера, моля і кандели, в основному, полягають в їх залежності від визначення кілограма, хоча мають місце й інші проблеми.

Таким чином, визначення кілограма через істинний природний інваріант – масу атома або ФФС – широко обговорюється метрологами щонайменше 30 останніх років, що відображено у ряді резолюцій ГКМВ, матеріалах МКМВ та його Консультативних комітетів. Не дивлячись на різні думки з цього питання, більшість з них зводиться до необхідності перевизначення кілограма і прийняття в якості еталонної величини або сталої Планка, або числа Авогадро [1].

На сьогодні є практичні успіхи ряду національних метрологічних інститутів (НМІ) в реалізації кілограма різними методами з простежуваністю до фундаментальних сталих. Хоча ці методи ще не дають необхідної точності, існує перспектива її досягнення.

Ще одною передумовою перевизначення одиниць через ФФС стали успіхи НМІ у підвищенні точності визначення ряду ФФС, що є обов'язковою умовою перевизначення одиниць через ці ФФС, а також досягнення в практичній реалізації ряду методів відтворення одиниць, що базуються на квантових ефектах і ФФС (квантові ефекти Джозефсона, Холла, ядерного магнітного резонансу та деякі інші).

Сукупність цих факторів призвела до того, що 23 ГКМВ у 2008 році прийняла Резолюцію «Про можливе перевизначення певних основних одиниць Міжнародної системи SI» [2], а 24 ГКМВ у 2011 р. сформулювала ці нові визначення, а також суть “Нової SI” (New SI) [3]. 26 ГКМВ (2014 р.) підтвердила ці рішення, але точної дати її введення не призначила (орієнтовно 2018 р.). Розглянемо суть Нової SI.

Відзначимо, що у виборі між «явними» визначеннями одиниць і визначеннями через сталі CGPM віддала перевагу визначенням через сталі.

Цитуємо витяг з проекту Нової SI [3] :

Міжнародна система одиниць (SI) буде системою одиниць, в якій:

частота надтонкого розщеплювання атома цезію-133 в основному стані ν_{Cs} складає точно 9 192 631 770 Герц,

- швидкість світла у вакуумі c складає точно $299\,792\,458$ м в секунду,
- стала Планка h складає точно $6,626\,06X \times 10^{-34}$ Дж с,
- елементарний заряд e складає $1,602\,17X \times 10^{-19}$ Кл,
- стала Больцмана k складає точно $1,380\,6X \times 10^{-23}$ Дж К⁻¹,
- стала Авогадро N_A складає точно $6,022\,14X \times 10^{23}$ моль⁻¹.

– світлова ефективність K_{cd} монохроматичного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц складає точно 683 лм Вт⁻¹,

де символ X є однією або декількома додатковими цифрами, які потрібно додати до числових значень h , e , k і N_A , у відповідності до останнього коректування CODATA (комітет із стандартних даних для науки і техніки).

Звідси витікає, що SI буде й надалі мати поточний набір семи базових одиниць, зокрема:

1) Кілограм залишиться одиницею маси, але його розмір встановлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Планка, щоб виходило точне значення $6,626\,06X \times 10^{-34}$ при вираженні в одиниці SI м² кг с⁻¹, що дорівнює Дж с,

2) Ампер залишиться одиницею електричного струму, але його розмір встановлюватиметься за допомогою фіксації числового значення елементарного заряду, щоб виходило точне значення $1,6\,02\,17X \times 10^{-19}$ при вираженні в одиниці SI с А, що дорівнює Кл,

3) Кельвін залишиться одиницею термодинамічної температури, але його розмір встановлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Больцмана, щоб виходило точне значення $1,380\,6X \times 10^{-23}$ при вираженні в одиниці SI м² кг с⁻² К⁻¹, що дорівнює Дж К⁻¹,

4) Моль залишиться одиницею кількості речовини, яка містить певну кількість елементарних частинок, наприклад, атомів, молекул, іонів, електронів, а також інших частинок або певних груп частинок, але його розмір встановлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Авогадро, щоб виходило точне значення $6,022\,14X \times 10^{23}$ при вираженні в одиниці SI моль⁻¹.

Міжнародний комітет з мір і ваг також пропонує переформулювати існуючі визначення секунди, метра й кандели в повністю еквівалентних формах:

1) Секунда є одиницею часу, її розмір встановлюється за допомогою фіксації числового значення частоти надтонкого розщеплювання атома цезію-133 в основному стані та за температури 0 К, щоб виходило точне значення $9192\,631\,770$ Гц,

2) Метр є одиницею довжини; її розмір встановлюється за допомогою фіксації числового значення швидкості світла у вакуумі, щоб виходило точне значення $299\,792\,458$ м с⁻¹,

3) Кандела є одиницею сили світла в певному напрямі; її розмір встановлюється за допомогою фіксації числового значення світлової ефективності

монохромного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц, щоб виходило точне значення 683 лм Вт⁻¹.

3. Аналіз запропонованих визначень основних одиниць. Не важко бачити, що в запропонованих визначеннях секунди, метра і кандели суттєвих змін не відбулось, вони залишились прив'язаними до тих же сталих, змінились лише формулювання.

Визначення ампера суттєво змінилось – зафіксована його простежуваність до елементарного заряду. Тим самим нове формулювання ампера вказує на методи його відтворення: опосередковано на основі квантових ефектів Джозефсона і Холла або ефекту одноелектронного тунелювання.

Суттєво змінюється також формулювання кельвіна – замість прив'язки його до потрійної точки води пропонується зв'язати його зі сталою Больцмана. Головним наслідком цього перевизначення може стати поступовий перехід еталонних вимірювань за шкалою МТШ-90 до вимірювань за допомогою «первинних термометрів».

Визначення моля через N_A як числа часток в молі, зв'язує моль з її точним значенням $N_A = 6,0221415 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, а також зберігає основне співвідношення між молярною масою речовини і масою структурних елементів.

Найбільш суттєвим є запропоноване перевизначення кілограма, яке розглянемо докладніше.

4. Про можливість створення природного еталона маси.

Вище було сказано, що кілограм – єдина одиниця SI, що відтворюється за допомогою прототипу з усіма недоліками цього способу. Тому вже багато років в національних метрологічних інститутах розвинених країн і в МБМВ ведуться роботи, метою котрих є прив'язка одиниці маси SI до стабільних фізичних ефектів, а через них – до фундаментальних фізичних сталих, тобто створення природного еталона кілограма.

Основними методами, які досліджувались, були:

1) метод порівняння електричної і механічної потужності за допомогою так званих «ватт-вагів» з подальшим відтворенням одиниці маси через електричні величини [4];

2) метод встановлення зв'язку між кілограмом і атомною масою якоїсь речовини (як правило, кремнію) за допомогою числа Авогадро [4];

3) метод «лівітуючої маси»;

4) метод накопичення іонів золота.

З названих методів найбільш перспективними виявились перші два, які розглянемо більш докладно.

Метод ватт-вагів. Процедура відтворення кілограма реалізується за допомогою комбінації чотирьох експериментів: відтворення вольта і ома на основі квантових ефектів Джозефсона і Холла відповідно, вимірювання прискорення вільного падіння і порівняння електричної потужності з механічною за допомогою ватт-вагів.

Маса в результаті цих експериментів може бути подана як функція двох джозефсонівських частот, сталої Планка і прискорення вільного падіння. Таким чином, цей метод ґрунтується на простежуваності до сталої Планка, а відтворений за його допомогою кілограм одержав назву «електричного».

Досягнута на сьогодні невизначеність відтворення кілограма цим методом оцінюється значенням $(7-8) \cdot 10^{-8}$, що свідчить про його перспективність.

Метод простежуваності до сталої Авогадро У спрощеному вигляді цей метод можна подати таким чином.

Число Авогадро N_A – кількість атомів, яка міститься на 0,012 кг ізотопу вуглецю ^{12}C . Якщо 0,012 кг містить N_A атомів, то в 1 кг повинно міститись X атомів, яке дорівнює

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

Цей метод одержав назву «атомного кілограма».

Підкреслимо: при визначенні кілограма через значення маси якоїсь елементарної частинки, наприклад, атома вуглецю ^{12}C , електрона, протона, тощо, необхідно визначити число Авогадро з невизначеністю близько 10^{-8} . Для вирішення цієї задачі необхідно виготовити кристали кремнію надвисокої чистоти і близької до ідеальної структури. Кількість атомів підраховується за допомогою рентгеноструктурного аналізу (XRCD-метод). Для цього в рамках Європейського союзу було проведено проект SIMUS, в якому проводилось вирощування кристалів кремнію, його обробка у вигляді кулі, точне вимірювання його діаметру та інші прецизійні операції.

Молекулярну масу кремнію визначали за допомогою мас-спектрометра, міжатомну відстань – шляхом комбінованого використання рентгенівської і оптичної інтерферометрії. За допомогою цих експериментів стала Авогадро була встановлена з невизначеністю близько $5 \cdot 10^{-8}$. В найближчі роки очікується її зниження до $(1-2) \cdot 10^{-8}$, що робить цей шлях перевизначення кілограма достатньо конкурентоспроможним.

В той же час автори перевизначень однозначно схилиються до методу «електричного кілограма», який ґрунтується на фіксації сталої Планка. Аргументується це, головним чином, тим, що якщо фіксується e (для перевизначення ампера), то фіксація також h призведе до точних значень сталої Джоузефсона $2e/h$ та сталої Клітцинга h/e^2 , що надзвичайно важливо для метрології в електриці.

На цей час рівень досягнутої точності і готовність апаратури до практичної реалізації кілограма недостатньо високі для того, щоб можна було ввести його в дію. Тому, як показано вище, остаточне введення нових визначень перенесено на більш віддалений термін

5. Наслідки впровадження нової SI. Найважливішим наслідком нової системи буде, безумовно, позбавлення від останнього артефакту – прототипу кілограма і перехід на його природне визначення. Це позитивно вплине також на інші одиниці, пов'язані з кілограмом.

Очевидно позитивним є наслідки перевизначення для метрології в електриці, де фактично вже склалась «практична» система еталонів, що ґрунтується на квантових ефектах.

Таким чином, виник дуалізм у визначеннях електричних одиниць, який полягає в існуванні одиниць SI і практичних, які простежуються до ФФС. Очевидно, що перевизначення усуває цей дуалізм

6. Висновок. Як видно, з наведених вище матеріалів, прийняття нових визначень ряду основних одиниць стане революційним кроком у плані подальшого вдосконалення міжнародної системи одиниць. Відзначимо, що ці пропозиції знаходять, в основному, підтримку у світі, дискусією викликає лише окремі деталі і терміни введення нових визначень. Найбільш важливими наслідками перевизначення стануть:

- усунення останнього артефакту і створення природного еталона кілограма;
- подолання дуалізму у визначеннях електричних одиниць
- уточнення значень ряду ФФС, що суттєво для фізики і науки в цілому;
- створення умов для переходу до природної системи одиниць

Список літератури: 1. Миллс Я. М. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля : предлагаемый подход к применению Рекомендации 1 МКМВ (C1-2005) / Я. М. Миллс, П. Дж. Мор, Т. Дж. Квинн и др. // Метрология. – 2007. – № 2. – С. 5–57. 2. XXIV CGPM, Paris, 2011. 24 CGPM Resolution 1. Резолюція 1 24 Генеральної конференції з мір та ваг. – Париж, 2011. 3. Кононогов С. А. Метрология и фундаментальные физические константы / С. А. Кононогов. – М. : Стандартиформ, 2008. – 269 с. 4. *Determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal* / B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl e. a. // Phys. Rev. Lett. – 2011. – V. 106, № 2. – P. – 030801.

Bibliography (transliterated): 1. Mills Ya. M. *Redefinition of kilogram, ampere, kelvin and asking: the offered approach to application of the Recommendation 1 MKMB (C1-2005)* / Ya. M. Mills, P. J. Mor, T. J. Quinn, etc.//Metrology. – 2007. – No 2. – P. 5-57. 2. XXIV CGPM, Paris, 2011. 24 CGPM Resolution 1. 24 General conference of measures and scales. – Paris, 2011. 3. Kononogov S. A. *Metrologiya and fundamental physical constants* / S. A. Kononogov. – M.: Standartinform, 2008. – 269 p. 4. B. Andreas *Determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal* / B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl e. a. // Phys. Rev. Lett. – 2011. – V. 106, No 2. – P. – 030801.

Надійшла (received) 17.04.2015