



КВАНТОВА МЕТРОЛОГІЯ — галузь науки, що вивчає методи надточних вимірювань на основі квантових явищ. Виникла як відповідь на потребу в більшій точності визначати фізичні величини та значно перевищує можливості класичної **метрології**. Завдяки квантовим ефектам науковці отримали можливість вимірювати час, довжину, масу, температуру та інші параметри з небувалою точністю, що є основою для розвитку сучасних технологій.

Історія К. м. розпочалася в середині 20 ст., коли з'явилися атомні годинники, що працювали на основі переходів між енергетичними рівнями атомів цезію. Вони стали фундаментом для визначення секунди в міжнародній системі одиниць (SI). Пізніше розвиток **квантової механіки**, лазерної техніки (див. **Лазерна технологія**, **Оптоелектронна та лазерна техніка**) та надпровідних технологій (див. **Надпровідність та надпровідні матеріали**) дозволив створювати дедалі точніші еталони. Від 2019 міжнародна система SI повністю базується на фундаментальних фізичних константах. Це стало можливим завдяки саме К. м., що дала змогу встановити сталі значення для заряду електрона, сталої Планка, сталої Больцмана та інших величин.

Використання квантових явищ нерозривно пов'язане з використанням фундаментальних фізичних сталих (ФФС) — незалежних фізичних сталих, що є переважно характерними коефіцієнтами фундаментальних фізичних теорій, μ . Фізична стала — це фізична величина, що має незмінне значення при визначених обставинах в обраній системі одиниць. ФФС — така фізична величина, значення якої визначене експериментально в обраній системі одиниць, містить інформацію про найбільш загальні (фундаментальні) властивості матерії та залишається незмінною за будь-яких умов. До ФФС належать швидкість світла у вакуумі, електрична й магнітна сталі, стала Планка, елементарний заряд (заряд електрона) тощо. Розрізняють універсальні, електромагнітні, атомні та фізико-хімічні сталі.

Розвиток науки і технологій у 21 ст. призвели до виникнення нової метрології, основними вимогами до якої стали підвищення точності відтворення одиниць, стабільності їх зберігання, доступність найвищої точності для практичної метрології. Основним напрямом розвитку нової метрології є прив'язка одиниць вимірювання до природних інваріантів — фундаментальних фізичних сталих, використання квантових ефектів і стабільних фізичних явищ для відтворення одиниць. Цей напрям названо К. м. Науковою основою К. м. є квантова механіка.

Основними фізичними ефектами, що використовують

в К. м., є ефекти атомних переходів, тунелювання електронів, квантування руху та енергії, ядерний магнітний резонанс, на основі яких розроблені практичні методи відтворення низки одиниць. Досвід використання квантових методів показав їх безумовні переваги над діючими на цей час (механічними, астрономічними тощо). Ці переваги проявилися при відтворенні одиниць часу і довжини, де вже відбулося перевизначення секунди й метра через фізичні сталі.

У нову SI (SI-2019) внесено низку суттєвих змін, зокрема: одиниці вимірювань формулюються у неявній формі — через «визначальні фізичні сталі»; 4 з 7-ми основних одиниць набули принципово нових визначень. Зокрема, основна одиниця від електрики — ампер, о в попередній версії SI визначалася через магнітну сталу μ_0 і механічні величини, в SI-2019 одержала нову основу — елементарний заряд e , який дорівнює $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ Кл точно. Перехід на квантові методи й еталони зробив прорив в точності відтворення електричних величин і практиці вимірювань в цій галузі в цілому.

Особливостями квантових методів, що дозволили їм підняти електричну метрологію на якісно новий рівень, є: відсутність методичної похибки (за винятком обмеження, пов'язаного з принципом «невизначеності Гайзенберга»; у брошурі Міжнародного бюро мір та ваг «Міжнародна система одиниць (SI)» записано, що квантові методи «дозволяють реалізувати всі одиниці з точністю, яка в кінцевому рахунку обмежується лише квантовою структурою природи та нашими технічними можливостями»); абсолютність вимірювань, тобто здатність вимірювати абсолютні значення фізичних величин (звідси відсутність потреби в калібруванні); мала залежність квантових ефектів від апаратурної реалізації, можливість візуально контролювати наявність квантового ефекту в процесі вимірювання.

Під «розрахунковим» характером квантових методів (еталонів) розуміється той факт, що відтворене значення фізичної величини є не результатом вимірювання в загальноприйнятому розумінні цього терміна, а результатом розрахунку. Класичним прикладом таких еталонів є еталон часу й частоти на квантовому переході в атомі цезію. Ще одним прикладом «розрахункового» еталона є еталон електричного опору на основі квантового ефекту Холла, де еталонне значення опору розраховують через дві визначальні сталі (Планка h і елементарний заряд e).

В Україні (ННЦ «Інститут метрології», Харків) створено первинні еталони на квантових ефектах одиниць часу-частоти на переході в цезії, постійної електричної напруги на ефекті Джозефсона, електричного опору на ефекті Холла, магнітної індукції

на ефекті ядерного магнітного резонансу. Квантові ефекти й відповідні вимірювальні технології зробили великий прорив у точності часо-частотних і електричних вимірювань і призвели до створення фактично нового приладобудування в цих галузях. Запровадження квантових методів і використання ФФС у вимірювальній практиці призвело до глибоких якісних змін не тільки в метрології, а й у більш широкому плані: у науково-технічному аспекті розвинуто теоретичні питання низки квантових явищ, надпровідності, розроблено нові методи вимірювань на їх основі, а також принципи побудови відповідних засобів вимірювання; в технологічному плані створено нові унікальні технології виготовлення мікро- і наноструктур для побудови матриць Джозефсона, приладів для реалізації квантових ефектів Холла і одноелектронного тунелювання, однофотонних джерел і детекторів оптичного випромінювання, квантових стандартів частоти радіо- і оптичного діапазонів; в метрологічній практиці досягнуто значний прогрес у підвищенні точності всіх видів вимірювань, в доступності найвищої точності

широким колам метрологів, у спрощенні систем передачі розмірів одиниць робочим засобам вимірювання. Аналізуючи досягнуті результати і темпи впровадження К. м. в практичну діяльність, можна прогнозувати подальший прогрес в створенні стабільних високотехнологічних еталонів на основі квантових явищ і поступовий перегляд ідеології побудови систем забезпечення єдності вимірювань.

Рекомендована література

1. K. von Klitzing, G. Ebert. The Quntum Hall Effect // Physica B+C. 1983. Vol. 117—118. Part 2;
2. Павленко Ю. Ф., Неєжмаков П. І., Маслова Н. М. Використання ефекту ядерного магнітного резонансу для відтворення електричних одиниць у NEW SI // Український метрологічний журнал. 2013. № 3;
3. E. O. Goebel, U. Siegner. Quantum Metrology. Foundation of Units and Measurements. New York, 2015.

Ю. Ф. Павленко, О. М. Васильєва

Бібліографічний опис:

Квантова метрологія / Ю. Ф. Павленко, О. М. Васильєва // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2025. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-891388>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).