

Прикладні аспекти: простежуваність вимірювань

УДК 006.91:530.145

П.І. Несєжмаков, Ю.Ф. Павленко

Національний науковий центр «Інститут метрології», Харків

КВАНТОВІ ЕФЕКТИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В МЕТРОЛОГІЇ

В статті розглядаються квантові ефекти, які вже знайшли використання в метрології, а також перспективи подальшого розвитку методології вимірювань, що базується на атомних і квантових явищах, де за еталон приймаються досліджені стабільні фізичні явища і сталі (константи).

Ключові слова: еталони одиниць вимірювань, одноелектронне тунелювання, ядерний магнітний резонанс, ефект Джозефсона, квантовий ефект Холла, невизначеність вимірювань

Вступ

У минулому ХХ сторіччі відбулась радикальна зміна уявлень щодо одиниць вимірювання та еталонів, які їх відтворюють. Система, що ґрунтується на механічних вимірюваннях і еталонах, подібних до платино-іридієвого еталона метра або еталона ампера у вигляді струмових ваг, поступово, але невідступно відходить у минуле. Вона замінюється новою системою, що спирається на атомні і квантові явища, де за еталон приймаються досліджені стабільні фізичні явища і сталі (константи).

Ця нова система вже одержала міжнародне визнання для таких одиниць, як секунда, що визначається через частоту надтонкого переходу в цезії, або метр, визначення якого пройшло еволюцію від довжини металевого стрижня через довжину хвилі випромінювання кріптону до довжини світлової хвилі.

В статті розглядаються квантові ефекти, які вже знайшли використання в метрології, а також перспективи подальшого розвитку методології вимірювань, що базується на квантових явищах

1. Квантова механіка і квантові ефекти

Науковою основою квантової метрології є квантова механіка – розділ теоретичної фізики, що вивчає закони руху частинок в області мікросвіту (в масштабі від 10^{-9} до 10^{-15} м).

Квантова механіка ґрунтується на гіпотезі М. Планка про дискретний характер зміни енергії атомів і на гіпотезі А. Ейнштейна – про фотони, на даних про квантованість деяких фізичних величин (наприклад, імпульсу сили і енергії). Основною в квантовій механіці є ідея про те, що корпускулярно-хвильова подвійність властивостей, встановлена для світла, має універсальний характер. Вона повинна

виявлятися для будь-яких частинок, що володіють імпульсом сили.

Засновником квантової теорії слід вважати саме М. Планка, який у 1900 р. запропонував новий підхід, що не відповідає класичним уявленням: розглядати електромагнітну енергію як дискретну, тобто таку, що може передаватися тільки окремими, хоч і дуже малими порціями (квантами). Як таку порцію Планк запропонував величину [1]

$$E = h\nu, \quad (1)$$

де E – порція (квант) енергії електромагнітного випромінювання; ν – частота випромінювання; h – коефіцієнт пропорційності, який одержав згодом назву сталої Планка.

Стала Планка h перекидає міст між мікро- і макросвітом через співвідношення (1), що пов'язує енергію E та частоту випромінювання ν . Так, в еталоні частоти енергія є мікроскопічною характеристикою атомних переходів, а частота випромінювання – макроскопічною величиною, доступною для спостережень. Можна сказати, що використання співвідношення (1) і стабільної частоти випромінювання (поглинання) при атомних переходах є основним методом квантової метрології, на якому створені квантові генератори радіо- і оптичного діапазонів, сучасні еталони часу і довжини.

Іншим явищем, яке використовується в квантовій метрології, є тунелювання електронів через потенційний бар'єр (наприклад, тонку плівку діелектрика в умовах надпровідності). Дослідження цього явища привело до відкриття ефекту Джозефсона і до створення на його основі еталонів постійної напруги [2]. Основне рівняння цього ефекту має вигляд:

$$U_j = n \frac{hf_0}{2e}, \quad (2)$$

де $2e/h = K_j$ – стала Джозефсона; $n = 1, 2, 3, \dots$ –

ціле число; e – елементарний заряд, f_0 – частота опромінення в ефекті Джозефсона.

Ще одним явищем, яке пояснюється лише з позицій квантової механіки, є квантування залежності електричного опору структури метал – діелектрик – напівпровідник від індукції прикладеного магнітного поля в умовах наднизьких температур (квантовий ефект Холла). Використання цього ефекту дозволило отримати реперні значення електричного опору за виразом

$$R_X = \frac{h}{me^2}, \quad (3)$$

де $\frac{h}{e^2} = R_K$ – стала Клітцинга; $m = 1, 2, 3, \dots$ і створити квантовий еталон ома [3]

При збігу частоти зовнішнього опромінювання з частотою прецесії ядра атома якоїсь речовини, поміщеної в магнітне поле, має місце ефект ядерного магнітного резонансу (ЯМР), який супроводжується атомним переходом і випромінюванням (поглинанням) енергії. Це явище дозволяє відтворити одиницю магнітної індукції B постійного магнітного поля [4, 5]

$$B_{\text{ямр}} = \frac{2\pi f}{\gamma_p}, \quad (4)$$

де γ_p – гіромагнітне відношення робочої речовини, f - частота прецесії.

Назвемо також ефект «одноелектронного тунелювання» або ефект Ліхарева [6]. Цей ефект виявляється у виникненні сходинок на осі струму вольт-

амперних характеристик надпровідних джозефсонівських переходів малої ємності при їх опроміненні СВЧ-полем (у відмінності від класичного джозефсонівського ефекту, де ці сходинокки мають місце на осі напруги).

При цьому відстань між сходинокками (тобто значення сили струму I) залежить лише від частоти тунелювання електронів f і сталої – заряду електрона e :

$$I = ef. \quad (5)$$

Це відкриває шлях до побудови квантового еталона ампера на основі цього ефекту. Однак досягнуті результати поки не дозволяють розглядати питання про практичну побудову еталона. Провідні світові центри метрології продовжують роботи в цьому напрямку.

До квантових методів можна віднести також деякі фізико-хімічні методи (у тому числі рентгенографічний), які використовуються для визначення числа структурних елементів речовини (зокрема, вуглецю), що в перспективі обіцяє створення еталона так званого «атомного кілограма».

Ці та інші методи, засновані на квантових явищах, дозволили суттєво підняти точність і достовірність вимірювань і склали основу квантової метрології. В табл. 1, 2 наведені хронологічні зміни рекомендованих чисельних значень CODATA сталих e , K_j , R_K , γ_p і невизначеності, з якими ці значення були отримані.

Розглянемо використання цих ефектів у метрології.

Таблиця 1

Чисельні значення і невизначеності e , K_j

Роки	Елементарний заряд, e		Стала Джозефсона, K_j	
	Чисельне значення, $\times 10^{-19}$, (Кл)	Відносна стандартна невизначеність, $\times 10^{-8}$	Чисельне значення, $\times 10^9$, (Гц·В ⁻¹)	Відносна стандартна невизначеність, $\times 10^{-8}$
2010	1,602176565(35)	2,2	483597,870(11)	2,2
2006	1,602176487(40)	2,5	483597,891(12)	2,5
2002	1,60217653(14)	8,5	483597,879(41)	8,5
1998	1,602176462(63)	3,9	483597,898(19)	3,9
1986	1,60217733(49)	30	483596,87(14)	30
1973	1,6021892(46)	290	483593,9(13)	260
1969	1,6021917(70)	440	483593,4(11)	220

Таблиця 2

Чисельні значення і невизначеності R_K , γ_p

Роки	Стала фон Клітцинга, R_K		Гіромагнітне відношення протона, γ_p	
	Чисельне значення, (Ом)	Відносна стандартна невизначеність, $\times 10^{-9}$	Чисельне значення, $\times 10^8$, (с ⁻¹ ·Тл ⁻¹)	Відносна стандартна невизначеність, $\times 10^{-8}$
2010	25812,8074434(84)	0,32	2,675222005(63)	2,4
2006	25812,807557(84)	0,68	2,675222099(70)	2,6
2002	25812,807449(84)	3,3	2,67515333(23)	8,6
1998	25812,807572(84)	3,7	2,67522212(11)	4,1
1986	25812,8056(12)	45	2,67522128(81)	30
1973	–	–	2,6751301(75)	280
1969	–	–	2,6751270(82)	310

2. Ефект Джозефсона і еталони вольты

На основі ефекту Джозефсона створено еталони одиниці напруги постійного струму – вольты в багатьох промислово розвинутих країнах. До складу перших еталонів входили кілька джозефсонівських контактів, які збуджувалися НВЧ-опромінюванням частотою 8...10 ГГц. Значення квантованої напруги становило при цьому 4...10 мВ. Оскільки за допомогою джозефсонівської напруги необхідно було калібрувати міри напруги (наприклад, нормальні елементи) з ЕРС близько 1 В, таке низьке значення відтвореної напруги змушувало включати до складу еталона масштабні перетворювачі напруги різної конструкції (подільники) для зв'язку з цими мірами. Це призводило до значної втрати точності. Однак надалі були створені інтегральні схеми (матриці), що включають до себе кілька тисяч послідовно з'єднаних контактів Джозефсона. Такі матриці дозволяють відтворювати безпосередньо напругу до 10 В при частоті $f_0 \sim 70$ ГГц [7, 8].

Кращі еталони на ефекті Джозефсона мають відносну розширену невизначеність відтворення постійної напруги на рівні $(1 - 2) \cdot 10^{-10}$.

Використання ефекту Джозефсона для відтворення змінної напруги.

Дослідження в цьому напрямку ведуться у технологічно розвинених країнах світу і обіцяють значний подальший крок в підвищенні точності електричних вимірювань, а одержані результати свідчать, що це відбудеться в найближчі роки.

Формування напруги змінного струму з використанням ефекту Джозефсона може бути виконане такими методами [8, 9]:

а) шляхом синтезу відліків постійної напруги U_i за допомогою так званих динамічних програмованих матриць;

б) опромінюванням матриці імпульсами зі змінною частотою повторення (кодоімпульсний метод);

в) шляхом частотної модуляції НВЧ-сигналу, який використовується для опромінювання матриці.

Розглянемо ці методи коротко (на основі публікацій Фізико-технічного інституту Німеччини (PTB)).

Метод синтезу відліків (PJVS - метод) полягає в отриманні серії дискретних відліків постійної напруги з виводів джозефсонівської матриці, розташованих, наприклад, за двоїчним кодом, і у формуванні східчастого сигналу змінного струму.

Після відповідного програмування система дозволяє синтезувати довільні форми напруги змінного струму. Основною проблемою в реалізації цього методу є створення спеціальних програмованих матриць. Як показано в [8, 9], цей 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 PTB розроблено **комбінований (PJVS+JAWS) метод**, який поєднує позитивні якості обох методів, тобто дозволяє одержати рівень напруги до 10 В з високою спектральною чистотою [9]. Невизначеність відтворення синусоїдальної напруги оцінюється значенням $(3-5) \cdot 10^{-8}$, частота до 200 кГц.

Експериментальні дослідження показали працездатність **методу ЧМ**, в розробці якого приймає участь ННЦ «Інститут метрології», але для уточнення його можливостей щодо рівня відтвореної змінної напруги і частотного діапазону, необхідні подальші поглиблені дослідження. Вже зараз можна сказати, що ці параметри пов'язані з параметрами матриці, зокрема з рівнем відтвореної постійної напруги і шириною сходинок її вольт-амперної характеристики.

Хоча використання ефекту Джозефсона не забезпечує такий широкий частотний і динамічний діапазони відтворення змінної напруги, як метод теплового компарування, але він дозволяє одержати на кілька порядків меншу невизначеність в НЧ діапазоні і, безумовно, займе своє особливе місце в метрології електричних вимірювань.

3. Квантовий ефект Холла і еталон електричного опору

Апаратура для відтворення електричного опору на основі квантового ефекту Холла містить у собі кріостат (герметизована ємність з рідким гелієм), у якому в спеціальному кріозонді знаходиться холівська структура, а також надпровідний соленоїд, що створює магнітне поле.

Крім цієї апаратури еталон одиниці електричного опору містить у собі групу прецизійних мір електричного опору, міст-компаратор і набір перехідних мір для передачі розміру одиниці між пристроями первинного еталона.

Розширена невизначеність відтворення опору кращих еталонів на квантовому ефекті Холла складає кілька одиниць на 10^{-8} .

4. Ефект ЯМР і еталон одиниці магнітної індукції

В еталоні використовується магнітний резонанс протонів у воді (водяному розчині FeCl_3) [10]. Розчин знаходиться в ампулі, на якій намотані ВЧ-котушки. Ампула поміщається в постійне магнітне поле між полюсами електромагнітна.

На катушку подається напруга від ВЧ-генератора. При збігу частоти ВЧ-генератора з частотою прецесії протонів має місце ЯМР, який супроводжу-

ється поглинанням енергії, що фіксується через детектор осцилографічним індикатором. Частота ВЧ-генератора в момент ЯМР вимірюється електронно-лічильним частотоміром, а відтворене значення магнітної індукції визначається зі співвідношення $V = 2\pi f / \gamma_p$. Розширена невизначеність при цьому складає $(1 - 3) \cdot 10^{-6}$.

5. Еталон ампера на основі квантових ефектів

Закон Ома дає можливість опосередкованого відтворення ампера на основі „квантового вольт” і „квантового ома” [11].

До вимірювального пристрою входять міри постійної напруги і електричного опору, відкалібровані 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

$$I = \frac{U_{Дж}}{R_X}, \quad (6)$$

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

$$U_{Дж} = n \frac{h}{2e} f_0 = n f K_{Дж}^{-1}; \quad R_X = \frac{h}{me^2} = \frac{1}{m} n m e f.$$

Тоді сила струму дорівнює:

$$I = n K_{Дж}^{-1} m R_K^{-1} f = \frac{1}{2} n m e f. \quad (7)$$

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. В 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 $5 \cdot 10^{-8}$ [15].

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

Перспектива прямого відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання

Ефект одноелектронного тунелювання або «ефект Ліхарева» було теоретично передбачено і експериментально перевірено ще у 80-і роки минулого століття [6].

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»,

тобто реалізувати незалежне відтворення трьох базових електричних одиниць на основі квантових ефектів. Це досягнення може стати серйозним імпульсом до подальшого розвитку метрології.

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 досягнуті певні успіхи.

Сьогодні відомо кілька варіантів приладів на ефекті одноелектронного тунелювання (SET - Single Electron Tunneling): так званий одноелектронний транзистор (SET - транзистор), виготовлений з використанням нанотехнологій [12] в Національному інституті стандартів (NIST, США) сумісно з Московським державним університетом і PTB, (Німеччина), а також більш складний пристрій, названий одноелектронним насосом (SET - pump) [13].

В США було створено електронний насос з сімома тунельними переходами і шістьма затворами. В результаті, за оцінками авторів, похибка рахування окремих електронів знизилася до $1,5 \cdot 10^{-8}$. 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.

У зв'язку з труднощами реалізації джерела струму, заснованого на SET-пристроях, NIST (США) був запропонований інший шлях проведення експериментів по встановленню зв'язку квантових еталонів вольт, ома і ампера [14]. 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 далеко від вирішення.

6. Перспектива подальшого використання квантових ефектів

На цей час квантові ефекти і засновані на них пристрої широко використовуються для відтворення одиниць часу – частоти, довжини, ряду електричних одиниць. Але галузі і сфера їх використання продовжують розширюватись. Вже створені зразки квантових стандартів в оптичному діапазоні частот з невизначеністю відтворення частоти близько $1 \cdot 10^{-16}$ і перспективою її подальшого зниження [15].

Квантові ефекти Джозефсона і Холла використовуються при дослідженні шляхів створення «природного» еталона кілограма методом урівноваження механічної і електричної енергії («електричний» кілограм), а також в первинній термометрії (шумовий метод Найквіста) [16].

Очевидна квантова перспектива простежується в оптичних вимірюваннях (саме з відкриття квантової природи світла почався розвиток квантової фізики). Сьогодні, коли з'являються пристрої з «гарантованим» генеруванням і детектуванням одиночних фотонів, слід очікувати нових «революційних» результатів в цьому напрямку [17].

Все це свідчить про велику перспективу квантових методів і технологій та подальшого розширення їх використання в метрології. Підкреслимо, що наслідком використання квантових ефектів є зміна методології відтворення ряду одиниць, що, в свою чергу, веде до необхідності їх перевизначення в системі SI. Як відомо, цей процес вже почався [18, 19].

Висновки

На сьогодні в існуючій Міжнародній системі одиниць (SI) офіційно сформульовано визначення і прийнято методику відтворення двох основних одиниць – секунди і метра – через квантові явища і відповідні фізичні сталі, що дозволило суттєво підвищити точність їх відтворення і доступність широкому колу метрологів.

На практиці вже більше 20 років використовуються для відтворення одиниць квантові ефекти Джозефсона, Холла, ЯМР, що дозволило майже на 3 порядки підвищити точність електричних вимірювань. Розвиток таких видів вимірювань як термометрія, фотометрія, маси і пов'язаних з нею величин показує велику перспективу використання в них квантових явищ і відповідних квантових пристроїв.

Наслідком використання квантових ефектів є зміна методології відтворення ряду одиниць, що, в свою чергу, веде до необхідності їх перевизначення в системі SI. Тому цілком логічно, що в 2011 р. 24-а Генеральна Конференція з мір та ваг (CGPM) прийняла Резолюцію 1 [20], в якій запропоновано повний перегляд SI. Згідно з цим рішенням, всі основні одиниці визначаються шляхом фіксації значень фундаментальних фізичних сталих.

Нова система має суттєві теоретичні переваги, але особливо важливими є її практичні переваги: нові еталони є більш доступними та дозволяють вченим і метрологам-практикам проводити вимірювання з більшою точністю, меншими технічними та експлуатаційними труднощами.

Список літератури

1. Planck M. // *Ständiger Bejwachter der Preußischen Akademie der Wissenschaften*. – 1899. – P. 440; *Annalen der Physik*. 1990. – V. 1. – P. 69.

2. Josephson B. // *Phys. Lett.* – 1962. – V. 1. – P. 251.
3. Klitzing K., Dorda G., Pepper M. *New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized – Hall resistance* // *Phys. Rev. Lett.* – 1980. – V. 45. – №6. – P. 494 – 497.
4. Purcell, Torrey, Paund // *Phys. Rev. Mod. Phys.* – 1946. – V. 18. – P. 323.
5. Bloch, Hansen, Packard // *Phys. Rev.* – 1946. – V. 69. – P. 127.
6. Likharev K., Zorin A. // *J. Low Temp. Phys.* – 1985. – V. 59. – P. 347.
7. Popel R. *The Josephson Effect and Voltage Standards* // *Metrologia*. – 1992. – V. 29. – P. 153 – 174.
8. Нимаїєр Ю. Матриці Джозефсона для прецизионных измерений напряжений постоянного и переменного тока // *Труды международной конференции «Метрология 2008»*. – Х.: ННЦ «Институт метрологии», 2008. – С. 16 – 21.
9. Нимаїєр Ю. и др. Современное состояние метрологии в области джозефсоновского напряжения переменного тока [Электронный ресурс] // *Труды международной конференции «Метрология 2012»*. Х.: ННЦ «Институт метрологии», 2012. – С. 12 – 15.
10. Зингерман В. И. и др. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции // *Український метрологічний журнал*. – 1996. – Вип. 2 – 3. – С. 36 – 40.
11. Катков А. С., Короткова И. В., Павлов О. М. Государственный первичный эталон единицы силы постоянного тока // *Измерительная техника*. – 1995. – № 1. – С. 3–4.
12. *Proceeding of the 22nd General Conference on Weights and Measures (Paris, 2003)*. – P. 314.
13. Fujii K. et al. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2005. – V. 54. – P. 854.
14. Steiner R.L. et al. // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2005. – V. 54. – P. 846.
15. Холл Дж. Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов и не только // *УФН*. – 2006. – Т. 176. – № 12. – P. 1353–1367.
16. *Reconciling Planck constant determinations via watt balance and enriched-silicon measurements at NRC Canada* / A. G. Steele, J. Meija, C. A. Sanchez, L. Yang, B. M. Wood, R. E. Sturgeon, Z. Mester and A. D. Inglis // *Metrologia*. – 2012. – Vol. – 49. – PP. L8–L10.
17. Назаренко Л. А., Неежмаков П. И., Тимофеев С. П. Квантова радіометрія та фотометрія // *Український метрологічний журнал*. – 2012. – Вип. 1. – С. 30–36.
18. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля: предлагаемый подход к применению Рекомендации 1 МКМВ (С1-2005) / Я.М. Миллс, П.Дж. Мор, Т.Дж. Квинни и др. // *Метрология*. – 2007. – № 2. – С. 5–57.
19. XXIV CGPM, Paris, 2011. 24 CGPM Resolution 1. Резолюція 1 24 Генеральної конференції з мір та ваг. Париж, 2011.
20. http://www.bipm.org/utis/common/pdf/24_CGPM_Resolutions.pdf

Надійшла до редакції 2.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І. П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки., Харків.

КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В МЕТРОЛОГИИ

П.И. Неежмаков, Ю.Ф. Павленко

В статье рассматриваются квантовые эффекты, которые уже нашли применение в метрологии, а также перспективы дальнейшего развития методологии измерений, основанные на атомных и квантовых явлениях, где за эталон принимаются исследованные стабильные физические явления и постоянные (константы).

Ключевые слова: *эталоны единиц измерений, одноэлектронное тунелирование, ядерный магнитный резонанс, эффект Джозефсона, квантовый эффект Холла, неопределенность измерений.*

THE QUANTUM EFFECTS AND THEIR APPLICATION IN METROLOGY

P.I. Neezhmakov, Ju.F.P avlenko

The quantum effects which are already applied in metrology and the prospects for further development of measurement methodologies based on atomic and quantum phenomena, which are taken as the standard investigated stable physical phenomena and stable values (constants) are considered in this article.

Key words: *standards of measurement units, single electron tunneling, nuclear magnetic resonance, Josephson effect, Hall quantum effect, uncertainty of measurement.*