

Особливості квантових еталонів і особливий статус секунди в SI-2019

П.І. Неєрмаков, О.М. Васильєва, Ю.Ф. Павленко

Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна
koropets@ukr.net; iurii.pavlenko@metrology.kharkov.ua

Анотація

Введення Нової SI у 2019 р. і визначення основних одиниць через "визначальні сталі" суттєво змінило методологію метрології і привело до впровадження квантового підходу при відтворенні одиниць. У статті підкреслено ряд особливостей квантових методів і еталонів, гранична точність яких обмежується лише "квантовою структурою природи". Для електричних вимірювань введення Нової SI означає кінець дуалізму, який існував із 1990 р. Дуалізм полягав у тому, що в SI діяло визначення основної одиниці від електрики – ампера – через механічні вимірювання та величини, а на практиці для еталонних вимірювань рекомендувалось використовувати квантові ефекти Джозефсона і Холла.

Розглядається ряд особливостей квантових методів і еталонів, які дозволили підняти точність відтворення електричних одиниць (а ще раніше – одиниць часу і довжини) на кілька порядків у порівнянні з "доквантовою" епохою.

Ще однією особливістю SI-2019 став той факт, що вона пов'язала одиниці всіх основних величин із секундою і тим самим відкрила шлях до відтворення одиниць через визначальні сталі (які в SI-2019 фіксовані без невизначеності) й секунду, яка вимірюється з найвищою точністю. Таким чином, основним завданням метрології стає встановлення зв'язку величини, що вимірюється, з секундою. В електричних і деяких інших видах вимірювань цю функцію виконують квантові методи, що наводяться у статті.

Надзвичайно висока точність вимірювання часу, можливість його передавання по комунікаційних лініях, а також системоутворювальний характер секунди визначають її особливий статус у SI-2019.

Показано, що успіхи у створенні стандартів частоти в оптичному діапазоні обіцяють подальше підвищення точності відтворення секунди, що лише підвищує її статус, а також може привести до її офіційного перевизначення через частоту іншого квантового переходу вже в оптичному діапазоні.

Висловлюється думка, що розвиток квантових методів вимірювання, рахунковий характер цих методів, названі в статті особливості секунди наближають нас до створення нової метрології, яка буде логічним продовженням квантової та яку можна умовно називати "цифровою".

Ключові слова: Нова SI-2019; квантові методи і еталони; секунда; визначальні сталі; перевизначення одиниць; невизначеність вимірювання.

Отримано: 06.12.2023

Відредаговано: 19.12.2023

Схвалено до друку: 22.12.2023

1. Вступ

У 2019 р. вступила в дію нова SI (далі SI-2019) [1, 2], основною рисою якої є визначення всіх основних одиниць через так звані "визначальні" сталі, числові значення яких фіксуються, тобто приймаються без невизначеності. Для електричних вимірювань це також означає фактичний перехід на **квантові методи** відтворення одиниць (неофіційний відбувся у 1990 р. із введенням "практичної" системи). Це методи, в підґрунті яких лежать ефект Джозефсона, квантовий ефект Холла, ядерний

магнітний резонанс, одноелектронне тунелювання.

Перехід на квантові методи й еталони дозволив кардинально (на 2–3 порядки) підняти точність відтворення електричних величин і рівень вимірювань у цій галузі в цілому.

2. Особливості квантових методів і еталонів

Особливостями квантових методів, які дозволили підняти часо-просторові та електричні вимірювання на якісно новий рівень, є:

• **Відсутність невизначеності методичного характеру.** Сам факт фіксації визначальних сталих без невизначеності свідчить про прийняття в SI-2019 концепції, що всі одиниці SI-2019 реалізуються з точністю, яка “обмежується лише квантовою структурою природи” [2].

• **Абсолютність вимірювань,** тобто здатність вимірювати абсолютні значення ФВ, звідси відсутність потреби в калібруванні.

• **Мала залежність** квантових ефектів від зовнішніх умов і апаратурної реалізації.

• **Можливість візуально контролювати** наявність квантового ефекту в процесі вимірювання (за квантуванням певної характеристики), тобто і достовірність “роботи” відповідної квантової формули, що знімає питання про стабільність еталона і відповідну складову невизначеності.

• **“Розрахунковий” характер квантових методів (еталонів),** під чим розуміється той факт, що відтворене значення фізичної величини є не результатом вимірювання в загальноприйнятому розумінні цього терміну, а результатом розрахунку. Класичним прикладом таких еталонів слід вважати еталон часу і частоти на квантовому переході в атомі цезію.

Ще одним прикладом “розрахункового” еталона є еталон електричного опору на основі квантового ефекту Холла [3, 4], де еталонне значення опору R_x розраховується через дві визначальні сталі (Планка h і елементарний заряд e)

за формулою $R = \frac{h}{me^2}$ (m – ціле число, номер

сходінки). При цьому наявність ефекту контролюється за квантуванням характеристики “опір R_x – магнітна індукція B ”. Цей підхід можна розповсюдити на інші електричні квантові еталони: напруги, що ґрунтується на ефекті

Джозефсона: $U_{\text{Дж}} = n \frac{hf_0}{2e}$; магнітної індукції B

(ефект ядерного магнітного резонансу (ЯМР):

$B = \frac{2\pi f_{\text{ЯМР}}}{\gamma_p}$; струму (ефект одноелектронного

тунелювання): $I = ef$, оскільки частоти f_i , які входять до відповідних формул, фактично теж є розрахунковими величинами. Все це дозволяє вважати названі квантові методи відтворення електричних одиниць первинними референтними методами, а відповідні еталони – первинними.

Зазначимо, що трохи осторонь знаходиться квантовий метод ЯМР, який у своїй класичній версії використовує протонний резонанс (резонанс ядра атому водню) і сталу – гіромагнітне відношення протона γ_p [3, 5]. Ця стала не входить до числа визначальних і не є зафіксованою, тому виникають

питання: чому так відбувається і який статус цього методу?

Ці питання розглянуто в [5], де показано, що відтворення одиниці магнітної індукції є водночас відтворенням одиниці сили струму. Але одиниця сили струму в New SI формулюється через **визначальну сталу** – елементарний заряд e , що робить неможливим фіксування ще одної сталої (через виникнення неузгодженості системи ФС). Таким чином, метод ЯМР зберігається у New SI як первинний референтний метод, але стала γ_p повинна прийматися зі своєю похибкою, яка за останнім визначенням CODATA становить $2,4 \times 10^{-8}$, тобто статус γ_p нижчий, ніж у визначальних сталих h, e, k, N_A [2].

Ще одною особливістю квантових методів є можливість поступової децентралізації метрологічного забезпечення, оскільки квантові ефекти в принциповому плані (за наявності відповідного устаткування) можуть бути реалізовані “де завгодно і коли завгодно” [2].

Таким чином, квантові ефекти і відповідні вимірювальні технології мають ряд особливостей, які значною мірою є важливим фактором їх метрологічної ефективності та надійності.

3. Особливий статус секунди в SI-2019

Останнє перевизначення (коригування формулювання) секунди було введено в дію в SI у 2019 р. Воно підтвердило визначення секунди через **фіксоване числове значення частоти $\Delta\nu_{Cs}$ надтонкого переходу атома цезію-133, що дорівнює 9 192 631 770 Hz.** Природно, що Консультативний комітет часу та частоти (ССТФ) також підтвердив практичні рекомендації з реалізації секунди *Mise en pratique* найкращим на цей час методом із використанням цезієвого репера частоти.

З відкриттям лазерних методів охолодження атомів, що ґрунтуються на взаємодії атомів із фотонами світла, а також з удосконаленням конструкції репера в останні роки вдалося значно підвищити точність цезієвого стандарту. При цьому значно еволюціонували й самі технології лазерного охолодження. Воно було вперше запропоновано у 1975 р. Хеншем і Шавлоу, а також Вайнлендом і Дехмельтом [3]. Це було охолодження за допомогою “оптичної патоки” – створення на перехресті шести лазерних променів щільного кріогенного середовища з температурою близько 0,1 К, потім були спеціальні **магнітно-оптичні пастки (Пфенінга, Пола), оптичні решітки, “Сізіфове охолодження”** до температури доплерівського порогу – 240 мкК, і навіть охолодження нижче доплерівського порогу – 43 мкК.

Створений на основі цих технологій еталон типу “цезієвий фонтан” має значно меншу нестабільність частоти за рахунок зниження

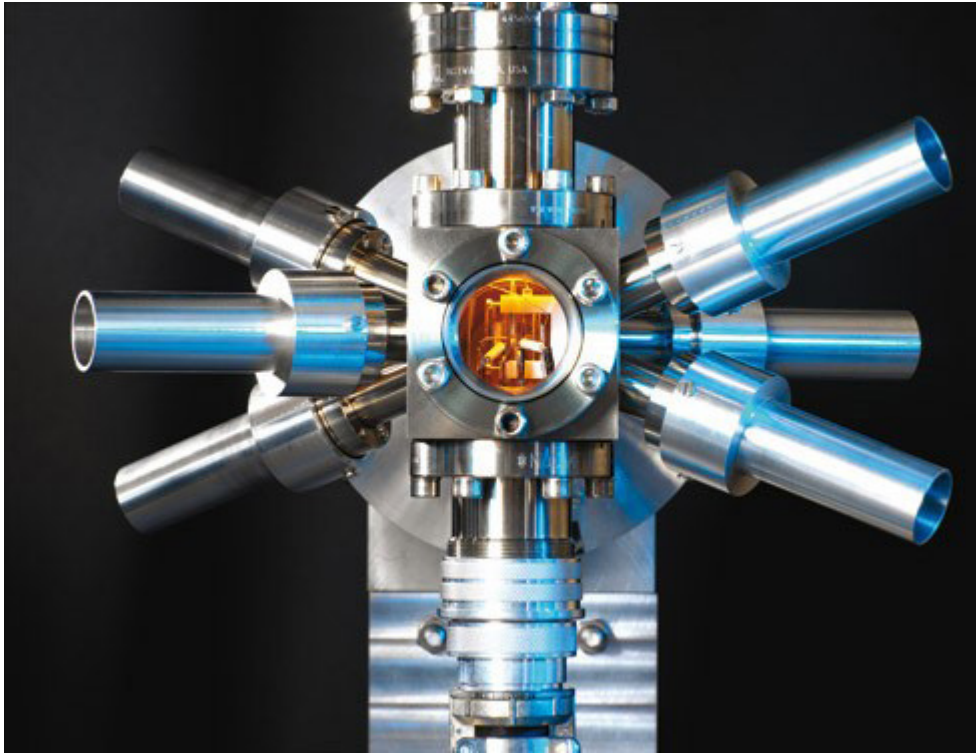


Рис. 1. Оптичний годинник на іонах стронцію з лазерним охолодженням

практично до нуля теплового руху атомів. Такі еталони має ряд передових країн, їхня відносна невизначеність становить близько 1×10^{-16} .

Але ще більш перспективними вважаються стандарти частоти, що працюють не в радіочастотному, а в оптичному діапазоні, зокрема, на переходах у стронції, ітербії та ртуті. З'явилися публікації про створення в РТВ (Німеччина) стронцієвого стандарту частоти на частоті 429 ТГц (оптичний діапазон, див. рис. 1) із невизначеністю на рівні $(1-3) \times 10^{-17}$. Близькі результати одержали і деякі інші провідні метрологічні центри [6, 7].

Додамо, що на початку XXI століття відбулися події, які назвали "великим синтезом лазерних технологій" [3, 6]. Окрім лазерів неперервного генерування були створені *лазери дуже коротких (фемтосекундних) імпульсів*, спектр яких являє "частотну гребінку" аж до оптичного діапазону,

тобто свого роду частотну лінійку. Це дало можливість дослідження *оптичних стандартів частоти*, оскільки вимірювання частоти в оптичному діапазоні є проблемою.

Оптичні стандарти частоти (ОСЧ) ґрунтуються на переходах в іонах різних хімічних елементів на частотах, що на кілька порядків перевищують робочу частоту цезієвих стандартів. Було доведено, що стабільність різних ОСЧ може підтримуватися на рівні від 1×10^{-17} до 1×10^{-18} [7].

Така висока точність відтворення, вимірювання і зберігання одиниці часу (частоти) – на 7–8 порядків вище, ніж будь-яка інша одиниця – визначає першу ознаку її особливого статусу. Другою ознакою є її системоутворювальний характер.

У системі SI-2019, тобто після перевизначення одиниць, секунда пов'язана з усіма іншими основними одиницями, за винятком моля [2]:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299792458} \right) \text{ s} = \frac{9192631770}{299792458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

$$1 \text{ kg} = \frac{(299792458)^2}{(6,62607015 \times 10^{-34})(9192631770)} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,4755214 \times 10^{40} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}.$$

$$1 \text{ A} = \frac{1}{(9192631770)(1,602176634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} e \approx 6,789687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e.$$

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,62607015 \times 10^{-34})(9192631770)^2 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 hK_{\text{cd}} \approx 2,614830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 hK_{\text{cd}}.$$

$$1 \text{ K} = \frac{1,380649 \times 10^{-23}}{(6,62607015 \times 10^{-34})(9192631770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2,2666653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}.$$

Таким чином, нова SI фактично зводить відтворення основних одиниць до вимірювання частоти, що дає безумовні переваги: по-перше, тому, що частота вимірюється з найвищою точністю, по-друге, тому, що її значення може передаватися по комунікаційних лініях зв'язку. Головним завданням метрології стає знаходження оптимальних методів зв'язку вимірювальної величини з частотою.

В електриці це досягається за допомогою технологій (методів), побудованих на основі розглянутих вище квантових ефектів, які дозволяють відтворити одиниці **постійної напруги** (ефект Джозефсона), **електричного опору** (квантовий ефект Холла), **магнітної індукції** (ядерний магнітний резонанс), **сили струму** (одноелектронне тунелювання). Крім того, одержавши через КЕХ значення електричного опору R , можна за допомогою квадратурних мостів-компараторів і, знов-таки, частоти (кілогерцового діапазону)

встановити рівності $R = \frac{1}{\omega C} = \omega L$ (за модулями)

і відтворити **одиниці електричної ємності C** та **індуктивності L** відповідно до виразів

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{R}{\omega};$$

$$C = \frac{1}{R\omega} = \frac{1}{\omega^2 L} \quad [3].$$

Підставивши у вирази для C і L значення опору Холла $R = \frac{h}{me^2}$, одержуємо

$$C_x = \frac{me^2}{h2\pi f_{Cs}}; \quad L = h/(me^2 2\pi f).$$

Для інших основних одиниць також існують методи, які дозволяють зв'язати їх із **частотою** [3].

4. Можливе перевизначення секунди

Як було сказано, найкращих результатів досягнуто в стандартах оптичної частоти, заснованих на різних видах переходів, у надзвичайно стабільних у часі нейтральних атомах. У зв'язку з цим СІРМ прийняв принципове рішення про підготовку нового визначення секунди і вибору кращого виду або сукупності видів квантових переходів для первинного відтворення секунди.

Розглядається декілька варіантів визначення. На сьогодні обговорюються 2 основні варіанти:

1) вибір однієї опорної оптичної частоти, на якій буде здійснюватись первинна реалізація секунди;

2) визначення на основі ансамблю обраних еталонних оптичних частот, оброблених за певним алгоритмом.

5. SI-секунда і обертання Землі

Говорячи про перевизначення секунди, звернемо увагу на статтю "Towards a consensus on a continuous coordinated universal time" Judah Levine, Patrizia Tavella and Martin Milton. Ось деякі цитати з неї.

"SI-секунда і обертання Землі. Тривалість "цезієвої секунди" було визначено на основі вимірювань, зроблених Марковіцем, Холлом, Ессеном і Перрі в 1950-х роках. Метою визначення було

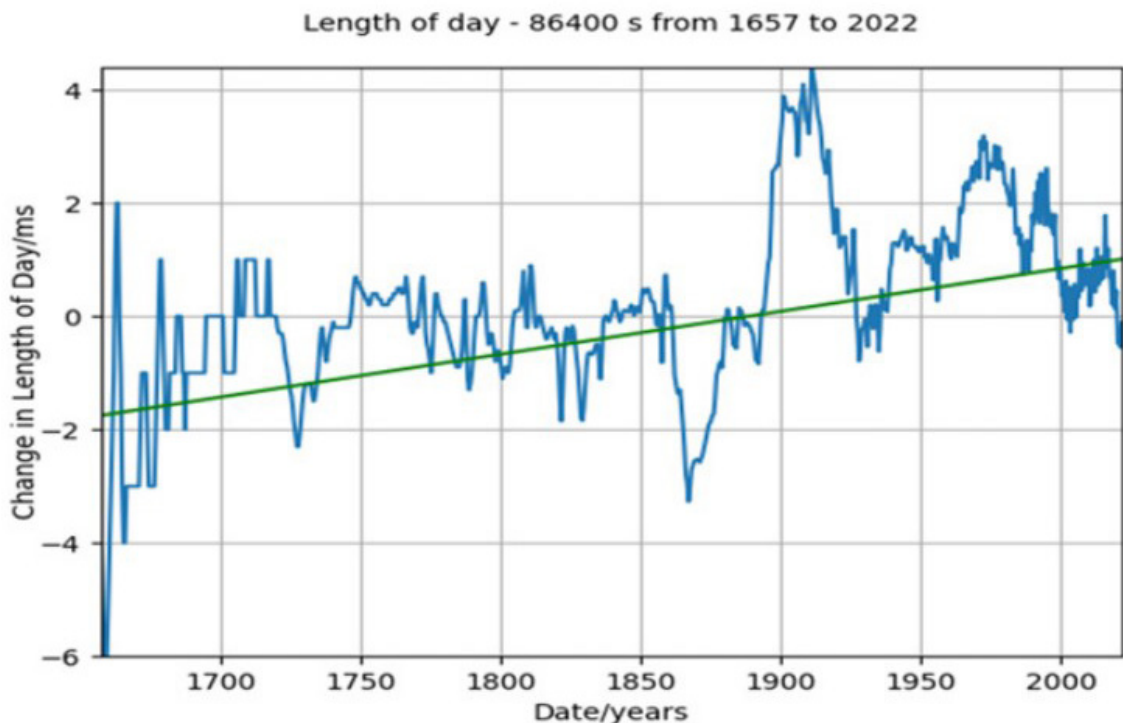


Рис. 2. Тривалість світлового дня з 1657 по 2022 рік [8]. Лінія нахилу показує довгострокове збільшення тривалості дня на 0,76 мілісекунди на століття. Є значні відхилення від цієї тенденції, які можуть тривати кілька років

забезпечення безперервності тривалості цезієвої секунди з попереднім визначенням, яке базувалося на ефемеридному часі... Результат цієї роботи визначив тривалість цезієвої секунди як рівну 9192 631 770 циклам частоти надтонкого переходу в основному стані цезію-133. З самого початку тривалість атомної секунди була коротшою, ніж експериментально визначена тривалість другої на основі обертання Землі в 1950-х роках, тому що світове уповільнення обертання Землі не розглядалося. Тому годинники, які використовували значення частоти цезію, виграли час щодо часу обертання, УТІ. Ряд методів коригування атомного часу, за допомогою яких намагалися вирішити цю проблему, були громіздкими і заплутаними... У нас може виникнути спокуса трохи довшого перевизначення атомної секунди, щоб впоратися з уповільненням Землі, але цей громіздкий підхід не допоможе. По-перше, безперервність у визначенні одиниць вимірювання є фундаментальною вимогою для того, щоб мати можливість підтримувати простежуваність щодо минулих вимірювань. Крім того, при спостереженнях обертання Землі ніколи не вдасться отримати суворой згоди з атомною метрологією, яка має похибку 10^{-18} , і обертанням Землі, яке показує зміни на рівні 10^{-7} . Нарешті,

будь-яка зміна визначення довжини атомної секунди зробить суттєвий вплив на всю систему одиниць SI, оскільки стандарт частоти явно визначає інші одиниці, наприклад еталон довжини. Він також неявно пов'язаний з іншими одиницями SI через різні відношення, такі як ефект Джозефсона" [8].

Ця стаття зайвий раз підкреслює ту визначальну роль, яку відіграє секунда в сучасних наукових дослідженнях, її особливий статус у Міжнародній системі одиниць, а також ту відповідальність і зваженість, які повинно бути виявлено при перевизначенні секунди.

6. Висновок: секунда і “цифрова метрологія”

Наостанок додамо, що встановлення зв'язку секунди з іншими основними одиницями, пошук можливостей використання секунди для відтворення і передавання інших одиниць, поряд з іншими новаціями в метрології (цифровізація апаратури, використання програмних і комп'ютерних рішень) наближають нас до створення “цифрової метрології”, хоча сьогодні ніхто конкретно не знає, як вона буде виглядати.

Як тут не згадати слова Нобелівського лауреата Артура Шавлоу: “Ніколи нічого не вимірюйте, крім частоти!”

Features of quantum measurement standards and special status of the second in the SI-2019

P. Neyezhnikov, O. Vasylieva, Yu. Pavlenko

National Scientific Centre “Institute of Metrology”, Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
koropetc@ukr.net; iurii.pavlenko@metrology.kharkov.ua

Abstract

The implementation of the New SI in 2019 and the definition of base units in terms of “defining constants” has significantly changed the metrology methods and led to the introduction of a quantum approach to the reproduction of units. The paper highlights a number of features of quantum methods and measurement standards, the ultimate accuracy of which is limited only by the “quantum structure of nature”. For electrical measurements, the implementation of the New SI means the end of the dualism that has existed since 1990. The dualism was that the SI defined the ampere – base unit of electricity – by mechanical measurements and quantities, and for reference measurements in practice, it was recommended to use the quantum effects of Josephson and Hall.

A number of features of quantum methods and measurement standards are considered, which made it possible to increase the accuracy of reproduction of electrical units (and even earlier – units of time and length) by several orders of magnitude compared to the “pre-quantum” era.

Another feature of the SI-2019 was the fact that it linked the units of all base quantities to the second and thus paved the way for the reproduction of units in terms of defining constants (which are fixed without uncertainty in the SI-2019) and the second, which is measured with the highest accuracy. Thus, the main task of metrology is to establish the relationship between the measured value and the second. In electrical measurements and some other types of measurements, this function is performed by quantum methods, which are described in this paper.

The extremely high accuracy of time measurements, the availability of its transfer via communication lines, and the system-forming nature of the second determine its special status in SI-2019.

The paper presents that the success in creating frequency measurement standards in the optical range promises further improvement of the accuracy of the second, which only raises its status and may lead to official revision of its definition in terms of the frequency of another quantum transition already existing in the optical range.

It is suggested that the development of quantum measurement methods, the counting nature of these methods, and the features of the second mentioned in the paper bring us closer to the creation of a new metrology that will be a logical continuation of quantum metrology and which can be conventionally called “digital”.

Keywords: New SI-2019; quantum methods and standards; second; defining constants; redefinition of units; measurement uncertainty.

Список літератури

1. Resolutions adopted at the 26th meeting of the CGPM (2018). Available at: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/26th-CGPM-Resolutions.pdf> (accessed 05.04.2019).
2. SI Brochure: The International System of Units (SI). 9th edition (2019). Available at: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
3. Ernst O. Göbel, Uwe Siegener. Quantum Metrology: Foundation of Units and Measurements. New York, Willey-VCH, 2015. 232 p.
4. K. von Klitzing, G. Ebert. The quantum Hall effect. *Physica B+C*, 1983, vol. 117–118, part 2, pp. 682–687.
5. 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. С. 3–10.
6. Мачехин Ю.П., Негрійко А.М., Соловьев В.С., Яценко Л.П. Оптические стандарты частоты. Ч. 1. Харьков: Коллегиум, 2010. 144 с.
7. Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology. *Nature Photon*, 2011, no. 5, pp. 203–210. doi: <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2011.45>
8. Judah Levine, Patrizia Tavella, and Martin Milton. Towards a consensus on a continuous coordinated universal time. *Metrologia*, 2023, vol. 60, 014001. doi:10.1088/1681-7575/ac9da5

References

1. Resolutions adopted at the 26th meeting of the CGPM (2018). Available at: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/26th-CGPM-Resolutions.pdf> (accessed 05.04.2019).
2. SI Brochure: The International System of Units (SI). 9th edition (2019). Available at: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
3. Ernst O. Göbel, Uwe Siegener. Quantum Metrology: Foundation of Units and Measurements. New York, Willey-VCH, 2015. 232 p.
4. K. von Klitzing, G. Ebert. The quantum Hall effect. *Physica B+C*, 1983, vol. 117–118, part 2, pp. 682–687.
5. Pavlenko Yu., Neyezhmakov P., Maslova N. Vykorystannia efektu yadernoho mahnitnoho rezonansu dlia vidtvorennia elektrychnykh odyntys u New SI [The use of the nuclear magnetic resonance effect for the reproduction of electrical units in the New SI]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2013, no. 3, pp. 3–10 (in Ukrainian).
6. Machehin Yu.P., Negrijko A.M., Solovev V.S., Yacenko L.P. Opticheskie standarty chastoty [Optical measurement standards]. Part 1. Kharkov, Kollegium Publ., 2010. 144 p.
7. Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology. *Nature Photon*, 2011, no. 5, pp. 203–210. doi: <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2011.45>
8. Judah Levine, Patrizia Tavella, and Martin Milton. Towards a consensus on a continuous coordinated universal time. *Metrologia*, 2023, vol. 60, 014001. doi:10.1088/1681-7575/ac9da5