

О. М. Васілевський, д.т.н., доцент

НЕПЕВНОСТІ КОНСТАНТ ЗАКЛАДЕНИХ В ПЕРЕГЛЯНУТІЙ МІЖНАРОДНІЙ СИСТЕМІ ОДИНИЦЬ (SI)

Ключові слова: непевність, стала Авогадро, стала Больцмана, стала Планка, елементарний заряд, система одиниць, значущі цифри

Із розвитком науки і техніки вимоги до точності вимірювань зростають. У зв'язку з цим Міжнародним Комітетом Мір та Ваг (CIPM) та Міжнародним Бюро Мір та Ваг (BIPM) заплановано проведення Генеральної Конференції Мір та Ваг (CGPM) у листопаді 2018 року для прийняття (введення в метрологічну практику) нових міжнародних визначень одиниць системи SI [1, 2].

У переглянутій Міжнародній системі одиниць (SI) чотири базові одиниці, а саме кілограм, ампер, кельвін і моль, будуть перевизначені з точки зору констант. Нові визначення будуть засновані на фіксованих чисельних значеннях постійної Планка (h), елементарного заряду (e), постійної Больцмана (k) і постійної Авогадро (N_A) [1, 2].

Після перевизначення SI буде являти собою систему одиниць, в якій [1 - 3]:

- незбурена частота надтонкого переходу основного стану атома цезію-133 дорівнює $9\,192\,631\,770$ (Гц);
- швидкість світла у вакуумі c становить рівно $299\,792\,458$ (м/с);
- стала Планка h дорівнює $6,626\,070\,04X \cdot 10^{-34}$ (Дж·с);
- елементарний заряд e дорівнює $1,602\,176\,620\,8X \cdot 10^{-19}$ (Кл);
- стала Больцмана k становить $1,380\,648\,52X \cdot 10^{-23}$ (Дж/К);
- стала Авогадро N_A становить $6,022\,140\,857X \cdot 10^{23}$ (моль⁻¹);
- світлова ефективність монохроматичного випромінювання частоти $540 \cdot 10^{12}$ (Гц) складає 683 (лм/Вт) [1-3].

Значення X являє залишкові цифри, що відкидаються.

Із довідникових даних Національного інституту стандартів і технологій США відомо, що стандартна непевність елементарного заряду складає $0,000\,000\,0098 \cdot 10^{-19}$ Кл, непевність сталої Планка складає $0,000\,000\,081 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, непевність сталої Больцмана складає $0,000\,000\,79 \cdot 10^{-23}$ Дж/К і непевність сталої Авогадро складає $0,000\,000\,074 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ [3, 4].

Для більш наочного представлення точності відтворення констант розрахуємо відносні непевності за формулою

$$\tilde{u} = \frac{u}{y} \cdot 100\% \quad (1)$$

де u – стандартна непевність, y – значення відтворюваної величини [5-8].

Підставляючи стандартні непевності констант і їхні значення у формулу (1) отримаємо відносні непевності відтворення:

- сталої Планка: $1,22 \cdot 10^{-6}\%$;
- елементарного заряду: $6,12 \cdot 10^{-7}\%$;
- сталої Больцмана: $5,72 \cdot 10^{-5}\%$;
- сталої Авогадро: $1,23 \cdot 10^{-6}\%$.

Якщо округлювати зазначені константи до певного знаку після коми, то стандартну непевність, що обумовлена округленням констант, в припущенні про рівноймовірний закон розподілу можна оцінити за формулою

$$u = \frac{\Delta X}{\sqrt{12}}, \quad (2)$$

де ΔX – значущі цифри, що відкидаються під час округлення [5 - 8].

При округленні зазначених вище констант, наприклад, до тисячних одиниць, і підставляючи значення відкинутих знаків у формулу (2) отримаємо

$$u_{B,h} = \frac{0,000070041 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{12}} = 0,00002022 \cdot 10^{-34} \quad (Дж·с);$$

-стандартної непевності сталої Планка

$$u_{B,e} = 0,0001766208 \cdot 10^{-19} / \sqrt{12} = 0,000050986 \cdot 10^{-19} \quad (\text{Кл});$$

$$u_{B,k} = 0,00064852 \cdot 10^{-23} / \sqrt{12} = 0,00018721 \cdot 10^{-23} \quad (\text{Дж/К});$$

$$u_{B,Na} = 0,000140857 \cdot 10^{-23} / \sqrt{12} = 0,000040662 \cdot 10^{-23} \quad (\text{моль}^{-1}).$$

Для представлення відносних непевностей констант, що обумовлені їх округленням до тисячних одиниць підставимо отримані стандартні непевності у формулу (1), в результаті чого отримаємо відносну непевність сталої Планка, що дорівнює $3,05 \cdot 10^{-4}\%$, відносну непевність елементарного заряду, що дорівнює $3,18 \cdot 10^{-3}\%$, відносну непевність сталої Больцмана, що дорівнює $1,36 \cdot 10^{-2}\%$ та відносну непевність сталої Авогадро, що дорівнює $6,75 \cdot 10^{-4}\%$.

Таким чином, при округленні констант закладених в переглянутій системі одиниці SI до тисячних одиниць їх відносні непевності у порівнянні з відносними непевностями, що обумовлені відомими на даний час знаннями про фундаментальних фізичних констант до певної кількості знаків після коми збільшуються у: 250 разів для сталої Планка; 5196 разів для елементарного заряду; 237 разів для сталої Больцмана; 548 разів для сталої Авогадро.

Як видно з розрахунків при округленні зазначених констант до тисячних одиниць найбільше збільшується відношення відносних непевностей елементарного заряду. Для його зменшення до рівня інших відношень, значення елементарного заряду необхідно округлювати до сотисязчних одиниць ($1,60218 \cdot 10^{-19}$ Кл). При цьому відносна непевність, що обумовлена округленням значення елементарного заряду складе $1,19 \cdot 10^{-4}\%$. Порівнюючи це значення відносної непевності із значенням відносної непевності, що обумовлена відомими на даний час знаннями про значення елементарного заряду до десятого знаку після коми видно, що відносна непевність, яка виникає при округленні до сотисязчних одиниць є у 195 разів більшою. Якщо округлювати інші значення констант до п'ятого знаку після коми, то відносна непевність відтворення сталої Планка складає $1,22 \cdot 10^{-6}\%$ ($6,62607 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), сталої Авогадро - $4,11 \cdot 10^{-6}\%$ ($6,02214 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹), сталої Больцмана - $1,78 \cdot 10^{-4}\%$ ($1,38065 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), тобто виконується співвідношення по точності 1:3 [9].

З проведеного аналізу відносних непевностей фундаментальних констант видно, що округлення значення елементарного заряду в порівнянні з іншими константами буде вносити найбільшу непевність у бюджет непевностей результатів досліджень, тому значення елементарного заряду рекомендується округлювати хоча б до шостого знаку після коми ($1,602177 \cdot 10^{-19}$ Кл) для зменшення бюджету непевностей при високоточних розрахунках.

Список використаних джерел

1. www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/
2. www.amu.in.ua/
3. The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. US National Institute of Standards and Technology. - www.nist.gov/
4. www.physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt
5. Васілевський О.М., Кучерук В.Ю., Володарський Є.Т. Основи теорії невизначеності вимірювань: [підручник]. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 230 с.
6. Vasilevskyi O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty // International Journal of Metrology and Quality Engineering, Volume 5, Issue 04, 403 (2014).
7. Vasilevskyi O.M., Kucheruk V.Y., Bogachuk V.V., Gromaszek K., Wójcik W., Smailova S., Askarova N. The method of translation additive and multiplicative error in the instrumental component of the measurement uncertainty // Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2016, 1003127 (September 28, 2016). - DOI:10.1117/12.2249195.
8. Vasilevskyi O.M. Methods of determining the recalibration interval measurement tools based on the concept of uncertainty // Technical Electrodynamics, 6, 81-88 (2014).
9. Васілевський О.М., Поджаренко В.О. Актуальні проблеми метрологічного забезпечення: [навчальний посібник]. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 214 с.