

ВИКОРИСТАННЯ ЕФЕКТУ ЯДЕРНОГО МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ОДИНИЦЬ У NEW SI

Ю.Ф. Павленко, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків

П.І. Неежмаков, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, перший заступник генерального директора ННЦ "Інститут метрології" з наукової роботи, м. Харків

Н.М. Маслова, науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків



Ю.Ф. Павленко

П.І. Неежмаков

Н.М. Маслова

Розглядається можливість використання ефекту ядерного магнітного резонансу і електромагнітної сталої – гіромагнітного відношення протона – для відтворення електричних одиниць у відповідності до їх визначення у "Новій SI".

The possibility of applying the effect of nuclear magnetic resonance (NMR) and electromagnetic constant – gyromagnetic ratio of the proton – is considered for reproduction of electrical units relatively to their definition in a new SI.

1. Вступ. Реформа SI і фізичні сталі

Як відомо, вже близько 10-ти років дискутується питання про перевизначення ряду основних одиниць Міжнародної системи SI в напрямку їх прив'язки до фундаментальних фізичних сталих як істинних природних інваріантів [1, 2].

Однією з головних вимог до системи вимірювань, яка ґрунтується на еталонах, є те, що вимірювання повинні співвідноситися з одними й тими ж еталонами. Це твердження, поряд з іншими факторами, стало основою для підписання в 1875 р. Метричної конвенції та створення метричної системи мір. З прийняттям цієї системи будь-яка людина, що виконує вимірювання, фактично співвідносить свої вимірювання з міжнародними еталонами. Однак через віддаленість цих еталонів було створено численні вторинні національні еталони, які періодично повинні були звірятися з міжна-

родними еталонами. Таким чином, результати вимірювань можуть бути зіставленні з міжнародними еталонами лише опосередковано, що призводить до погіршення потенційно досяжної точності вимірювань. Звідси виникають такі вимоги: а) основні еталони мають бути безпосередньо доступні всім, хто бере участь у процесі вимірювання; б) для забезпечення найкращих результатів вимірювань еталони повинні мати найнижчу невизначеність, яка забезпечується сучасним станом розвитку науки і техніки; в) для того щоб можна було порівнювати результати, отримані в різні інтервали часу, еталони повинні бути стабільними.

Характерною особливістю еталонів, що базуються на механічних вимірюваннях, є необхідність частих і трудомістких звірень вторинних і робочих еталонів з первинними еталонами, що зберігаються в одній або різних лабораторіях. Це необхідно для підтримки узгодженості всієї системи. Для вирішення перелічених вище проблем 24-та Генеральна конференція з мір та ваг (CGPM) у жовтні 2011 р. підтвердила свою рішучість провести перевизначення, а також сформулювала проект Нової SI (New SI), яка може бути прийнята на черговому, 25-му засіданні CGPM у 2014 р. Суть New SI полягає у визначенні всіх основних одиниць SI через фізичні сталі та фіксації значень цих сталих. Як відомо, секунду, метр і канделу вже визначено через сталі, а Резолюція 1 24-ї CGPM прив'язує кілограм, ампер, кельвін і моль до сталих Планка h , елементарного заряду e , Больцмана k і Авогадро N_A відповідно. Таким чином, усі сім основних одиниць після введення в дію New SI будуть визначені через фізичні сталі.

Що стосується електричних вимірювань, то тут з 1990 р. фактично вже існує New SI у вигляді так званих *практичних одиниць*, які ґрунтуються на:

- фіксації $K_{J,90} = 2e/h$ і використанні ефекту Джозефсона для відтворення одиниці електричної напруги – вольт; $K_{J,90} = 2e/h$ – стала Джозефсона, зафіксована у 1990 р.;

• фіксації $R_{K-90} = h/e^2$ і використанні квантового ефекту Холла для відтворення одиниці електричного опору – ома; $R_{K-90} = h/e^2$ – стала Клітцинга, зафіксована у 1990 р.

На цих двох одиницях, визначених через сталі e і h , може бути відтворено ампер, а з використанням також одиниці часу (частоти) і законів електродинаміки – всі інші електричні одиниці в *практичній системі* [3].

Ще одним ефектом, який, можливо, буде використовуватися для створення еталона ампера, є ефект *одноелектронного тунелювання* [4]. Хоча говорити про еталон на цьому ефекті ще рано, дослідження в цьому напрямку успішно продовжуються. Сукупність цих трьох квантових явищ одержала назву “квантового трикутника”, “замикання” якого (створення квантового еталона ампера) повинно привести до подальшого розвитку квантової метрології і підвищення точності електричних вимірювань.

Усі ці питання досить детально розглянуто в літературі, у тому числі в нашій статті [3]. Розгляду можливостей ще одного ефекту, а саме, ефекту *ядерного магнітного резонансу* (ЯМР) [5, 6], що базується на використанні електромагнітної сталої – *гіромагнітного відношення ядра* робочої речовини (як правило, в якості робочої речовини використовується водень, ядром якого є протон), присвячено цю статтю. Нагадаємо, що саме на ефекті ЯМР створено еталони одиниці магнітної індукції – тесла – в найбільш поширеному діапазоні від 0,5 до 10 Тл.

2. Деякі особливості використання і фіксації сталей у метрології

У сучасній фізиці параметри атомів відіграють роль природних сталей, які можна використовувати для визначення одиниць вимірювань і створення еталонів. Характеристики, які можуть бути використані метрологією, постають як середні властивості еквівалентних об’єктів або як властивості штучного або природного унікального об’єкта. Всі основні одиниці SI, крім ампера, відповідають основним еталонам, на основі яких у разі необхідності створюються еталони похідних одиниць. Ситуація з електричними і магнітними величинами якісно інша. Ампер визначено як одиницю електродинаміки, але найбільш важливі на практиці (і найбільш точні) вимірювання належать до електротехніки. В існуючій SI визначення ампера – це не визначення одиниці, яка відтворюється, а визначення значення магнітної сталої $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м⁻¹ для зведення електричних і механічних явищ. Фіксація μ_0 забезпечила ідентичність електричних і механічних одиниць потужності й енергії.

Таким чином, на практиці національні еталони електромагнітних одиниць створювалися незалежно від визначень системи SI (у вигляді артефактів). Потім під час спеціальних експериментів проводилися порівняння між одиницями як однієї (вольт, ом),

так і різної (фарада і ом) розмірності, а також між національними та міжнародними реалізаціями. Ця тенденція збереглася і до теперішнього часу.

Як свідчить досвід, домінуюча складова бюджету невизначеності еталона-артефакту – систематична. Враховуючи, що параметри еталона неминуче змінюються з часом, перевірка його довготривалості відтворюваності – серйозна науково-технічна проблема. Вирішити цю проблему раніше намагалися шляхом порівняння первинних еталонів, що базувалися на визначеннях SI, з еталонами-артефактами, які калібрувалися за первинними еталонами.

З відкриттям ряду квантових ефектів було усвідомлено, що вони забезпечують значно більшу точність і стабільність, ніж методи, що ґрунтуються на механічних вимірюваннях. Спочатку макроскопічні квантові ефекти використовувалися для контролю стабільності електричних одиниць. Ситуація почала змінюватися з прийняттям Міжнародним комітетом мір та ваг (CIPM) рішень [7, 8] щодо відтворення вольта і ома на основі макроскопічних квантових ефектів Джозефсона і Холла з 1 січня 1990 р. і використанні постійної фон Клітцинга для вираження значення еталонного опору [9], починаючи з 2000 р. Ці рішення базувалися на тому факті, що відтворення одиниць за допомогою квантових еталонів через фундаментальні сталі усуває проблему дрейфу.

Таким чином, в електриці вже більше 20-ти років фактично використовується прообраз New SI – практична система.

Аналогічно амперу, де альтернативою є фіксація або μ_0 , або e , вирішується питання і з відтворенням одиниці опору – ома. У SI для відтворення ома використовується так званий *розрахунковий конденсатор*, де в розрахунку фаради-SI фігурує μ_0 (точніше, електрична стала $\epsilon_0 = 1/(c^2 \mu_0)$). Від фаради через частоту можна перейти до ома. Проте більш успішним виявився підхід, який ґрунтується на квантовому ефекті Холла, в межах якого опір визначається через сталу R_K , відому без похибки (New SI). Таким чином, фарада-SI і ом-New SI є конкурентами, що видно також із співвідношення [10]

$$R_K = \frac{c\mu_0}{2\alpha},$$

яке дозволяє зафіксувати значення або R_K , або μ_0 , але не обидві сталі одночасно ($\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c)$) – стала тонкої структури, яка є фундаментальною фізичною сталою, що характеризує силу електромагнітної взаємодії і може бути найбільш точно визначена в рамках квантової електродинаміки різними способами).

Наступний крок, який було зроблено на 24-й CGPM, полягає у визначенні основних одиниць через сталі і фіксації числових значень цих сталей.

Зазначимо, що оскільки ампер і кілограм між собою пов’язані, існування практичної системи в пре-

цизійних електричних вимірювання веде до нового значення електричного аналога кілограма: $1\text{В}^2\cdot\text{Ом}^{-1}\cdot\text{с}^3\cdot\text{м}^{-2}$, який дещо відрізняється від кілограма-SI, а μ_0 стає вимірюваною величиною. Крім того, у мікроскопічних вимірюваннях маси також фактично має місце використання практичних одиниць. Строго кажучи, результат вимірювання маси частинки або атома, виражений в електрон-вольтах-90, буде більш точним, ніж в електрон-вольтах-SI, але це вже буде практична система. Аналогічний результат має місце при перерахуванні результатів, виражених в атомних одиницях маси. Переведення атомних одиниць маси в кілограми менш точне, ніж в електрон-вольти, за умови використання вольта-90 [10].

Таким чином, в SI кілограм визначається фіксацією двох параметрів – масою платино-іридієвого прототипу $m(IPK)$ і μ_0 , в New SI – фіксацією e і h .

Для відповіді на питання: чи можна зафіксувати значення гіромагнітного відношення протона, як це планується зробити зі сталими h , e , k і N_A , розглянемо, які величини (сталі) були зафіксовані в SI і будуть зафіксовані в New SI (див. таблицю).

Одиниця	Величини (сталі)	
	SI	New SI
Кілограм	Маса прототипу $m(IPK) = 1 \text{ кг}$ точно = const $\mu_0 = const$	$m(IPK) \neq const$ $h = const$ $\mu_0 \neq const$
Ампер	Магнітна стала $\mu_0 = const$	$\mu_0 \neq const$ $e = const$ $K_J = \frac{2e}{h} = const$, $R_K = \frac{h}{e^2} = const$
Кельвін	Потрійна точка води $T_{\text{ПТВ}} = 273,16 \text{ К}$ точно = const	$T_{\text{ПТВ}} \neq const$ $k = const$
Моль	Молярна маса вуглецю-12 $M(^{12}\text{C}) = const$	$M(^{12}\text{C}) \neq const$ $N_A = const$

Таким чином, у New SI:

- фіксуються значення сталих h , e , k і N_A , до яких прив'язані розміри кілограма, ампера, кельвіна і моля відповідно;

- маса міжнародного прототипу кілограма $m(IPK)$, температура потрійної точки води $T_{\text{ПТВ}}$, магнітна стала μ_0 і молярна маса вуглецю-12 більше не будуть точно відомими і повинні визначатися експериментально;

- для ампера вирази $K_{J-90} = const$, $R_{K-90} = const$ можуть бути замінені на $e = const$, оскільки h вже зафіксовано в новому визначенні кілограма. Взагалі, сталі h і e слід розглядати як нероздільну пару.

Із цього розгляду неважко побачити, що одиниця може спиратися лише на одну зафіксовану величину або сталу (для кілограма – на одну з пар: або $m(IPK)$ і μ_0 , або e і h), і це є однією з умов узгодженості одиниць і єдності їх значень.

Розглянемо тепер ефект ядерного резонансу і сталу – гіромагнітне відношення протона.

3. Ядерний магнітний резонанс і еталон одиниці магнітної індукції

Ефект ЯМР відкрито у 1946р. Блохом і Парселем [5, 6]. Суть його полягає в тому, що ядро атома, маючи механічний і магнітний моменти, здійснює у магнітному полі прецесійний рух, аналогічний руху “вовчка” у полі тяжіння Землі. Частота прецесії $f_{\text{пр}}$ атомного ядра робочої речовини визначається магнітно-механічними властивостями ядра цієї речовини і значенням напруженості магнітного поля H , в якому воно знаходиться:

$$2\pi f_{\text{пр}} = \mu_0 \gamma H \quad (1)$$

де μ_0 – магнітна стала; γ – атомна стала – відношення магнітного моменту ядра до його механічного моменту, названа *гіромагнітним відношенням ядра*; $\mu_0 H = B$ – магнітна індукція.

Якщо частота прецесії збігається з частотою зовнішнього електромагнітного поля, то має місце явище ЯМР, яке супроводжується резонансним поглинанням або випромінюванням енергії, що виникає внаслідок переходу атома з одного енергетичного рівня на інший.

З формули (1) виходить, що

$$B = \frac{2\pi f_{\text{ЯМР}}}{\gamma} \quad (2)$$

тобто, якщо гіромагнітне відношення ядра застосовуваної речовини відоме, то задача зводиться до вимірювання частоти прецесії $f_{\text{ЯМР}} = f_{\text{пр}}$.

Метод із використанням ЯМР знайшов широке застосування у вимірювальній техніці ряду країн, зокрема, при побудові вимірювачів магнітної індукції (тесламетрів), різноманітної апаратури для випробувань магнітотвердих матеріалів тощо. Саме за допомогою цього методу була досягнута найвища точність вимірювань ряду магнітних величин, що обумовило його використання в первинних еталонах одиниці магнітної індукції. При реалізації методу ЯМР як робочу речовину найчастіше використовують водень, дейтерій, літій.

Установлено, що найбільш потужний сигнал ЯМР має місце при використанні ядра атома водню, тобто протона, гіромагнітне відношення якого γ_p є однією з фізичних сталих. На підставі обробки визначень ряду країн CODATA (Committee on Data for Science and Technology – Комітет чисельних даних для науки та техніки) установив його рівним $2,675222005(63) \cdot 10^8 \text{с}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$ з відносною стандартною невизначеністю $2,4 \cdot 10^{-8}$ [11]. Гіромагнітне відношен-

ня протона — одна з найважливіших стохастичних величин, яка в комбінації з e/h дозволяє визначити сталу тонкої структури.

Знаючи гіромагнітне відношення протона

$$\gamma_p = 2\mu_p / \hbar,$$

де μ_p — магнітний момент протона, \hbar — постійна Планка, можна виразити значення магнітного поля, а, отже, і струму через частоту. Це дозволяє не вдаватися до нормальних елементів і резисторів для реалізації еталонних струмів в період між визначеннями ампера за допомогою струмових вагів (ампер-вагів) і, таким чином, дає можливість визначити ампер в термінах вимірюваної частоти.

Принцип побудови еталона на цьому ефекті пояснюється за допомогою спрощеної структурної схеми, наведеної на рис. 1 [12].

Використовується резонанс протонів у воді (водяному розчині FeCl_3). Розчин знаходиться в ампулі, на якій намотано ВЧ-котушки. Ампула розміщується в магнітному полі постійного струму між полюсами електромагніта (у робочому зазорі). Вісь котушки повинна бути перпендикулярна вектору вимірюваної індукції магнітного поля.

На котушку подається напруга від ВЧ-генератора, внаслідок чого навколо зразка створюється змінне магнітне поле. У разі збігання частоти ВЧ-генератора з частотою прецесії протонів має місце ЯМР, що супроводжується поглинанням енергії. При цьому ВЧ-напруга на котушці падає, що фіксується через детектор осцилографічним індикатором. Частота ВЧ-генератора в момент ЯМР вимірюється електронно-лічильним частотоміром, а відтворене значення магнітної індукції визначається із співвідношення (2). Регулювання значення магнітної індукції здійснюється за допомогою блока

живлення шляхом регулювання напруги на електромагнітах.

Реальна схема еталона значно складніша: для забезпечення необхідних метрологічних характеристик еталон містить у собі ряд додаткових систем.

У колишньому СРСР було створено два державних еталони на ефекті ЯМР: для середніх магнітних полів (ХДНДІМ, Україна) і сильних магнітних полів (ВНИИФТРИ, Росія).

Перший з них (рис. 2) має такі метрологічні характеристики [12]:

Діапазон значень магнітної індукції B , Тл	від 0,05 до 2
Середнє квадратичне відхилення S_0	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Невилучена систематична похибка θ_0	$< 3 \cdot 10^{-6}$
Розширена невизначеність відтворення одиниці	$< 4 \cdot 10^{-6}$

Другий еталон має деякі особливості, які розглянуто в [13].

Метрологічні характеристики еталона сильних магнітних полів:

Діапазон вимірювання, Тл	від 1 до 10
Середнє квадратичне відхилення S_0	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Невилучена систематична похибка θ_0	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Розширена невизначеність відтворення	$1 \cdot 10^{-5}$

Метод із використанням ефекту ЯМР у порівнянні з усіма відомими методами дозволяє досягти найвищої точності відтворення одиниці магнітної індукції постійного магнітного поля, а через неї — інших магнітних одиниць.

Однією з домінуючих складових невилученої систематичної похибки в обох еталонах є похибка визначення γ_p , яка на той час (1995р.) становила $0,6 \cdot 10^{-6}$.

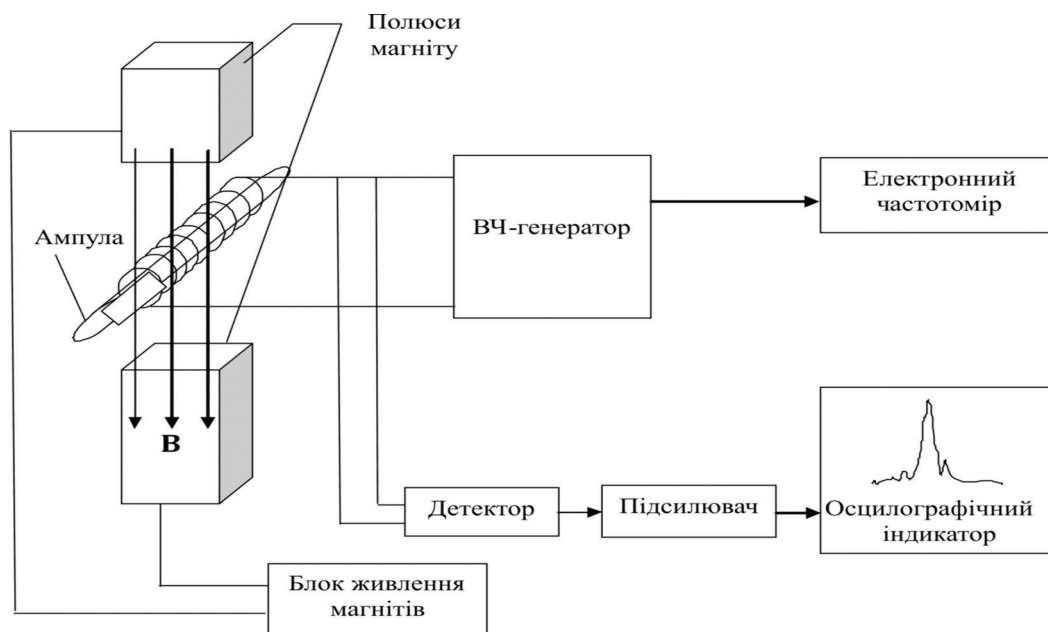


Рис. 1. Структурна схема еталона магнітної індукції

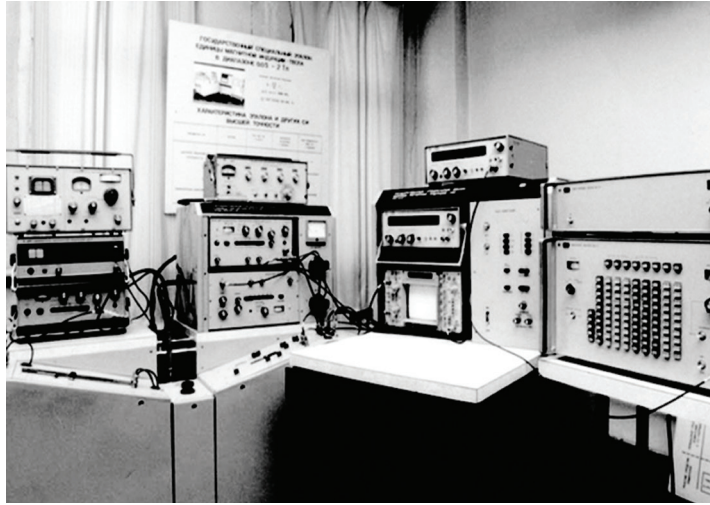


Рис. 2. Державний еталон магнітної індукції у діапазоні від 0,05 до 2 Тл

Підкреслимо: урахування похибки сталої означає, що одиниця (у даному разі – тесла) відтворюється в класичній SI.

Виникає питання: чи не можна зараз, коли вводиться New SI, що базується на сталих, не враховувати цю похибку, тобто зафіксувати прийняте на сьогодні значення γ_p .

Для відповіді на це питання напишемо вираз для значення магнітної індукції котушки зі струмом:

$$B = \mu K_K I, \quad (3)$$

де μ – магнітна проникність середовища; I – сила струму в котушці; K_K – коефіцієнт, що залежить від форми і геометричних розмірів котушки.

Якщо магнітну індукцію виміряно за допомогою методу ЯМР, тобто $B = 2\pi f_{\text{ямр}} / \gamma_p$, то сила струму буде

$$I = \frac{B}{\mu K_K} = \frac{2\pi f_{\text{ямр}}}{\gamma_p \mu K_K}. \quad (4)$$

Це означає, що відтворення одиниці магнітної індукції є водночас відтворенням одиниці сили струму (4). Але одиниця сили струму в New SI визначається через зафіксовану сталу – елементарний заряд e , що робить неможливим фіксування ще однієї сталої.

Таким чином, метод ЯМР зберігає у New SI своє значення як найбільш точний метод відтворення одиниці магнітної індукції, а через неї – інших магнітних величин, і також як один з методів визначення сталої Планка.

Метод із використанням ЯМР спільно з методом ампер-вагів у свій час було успішно застосовано для уточнення значення ампера, що знайшло відображення у рішенні XII сесії Консультативного комітету з електрики СІРМ (1968 р.) і рішенні Ученої ради ВНИИМ (зберігача первинного еталона ампера СРСР) у 1969 р. [14].

Додамо, що в існуючих еталонах ряду країн, зокрема, комплексному еталоні магнітних одиниць Росії, ефект ЯМР і гіромагнітне відношення прото-

на використовуються для узгодження всіх магнітних одиниць на постійному і змінному струмі [15, 16].

4. Коротка історія і перспективи використання ефекту ядерного магнітного резонансу в метрології

Першим використанням ефекту ЯМР після його відкриття в 1946 р. стало вимірювання за його допомогою гіромагнітного відношення ядра водню – протона (γ_p). Перші визначення γ_p були проведені Томасом (1950 р.), Дрісколом і Бендером (1958 р.) – всі NBC, США. Значний внесок у ці дослідження зробили також Вігуро (1962 р., NPL, Велика Британія), Хара (1968 р., ETL, Японія), Кантуллер (1961 р., РТВ, Німеччина), Н.В. Студенцов з колегами (1961 р., ВНИИМ, Росія), Г.К. Ягола, В.І. Зінгерман з колегами (1961 р., ХДНДІМ, Харків, Україна). Підкреслимо, що поряд із роботами всесвітньо відомих метрологічних центрів суттєвий внесок у ці дослідження зробили роботи ХДНДІМ [17, 18], які були враховані у Узгодженнях (1969, 1973, 1986 рр.) CODATA [19–21] і яким було надано високу оцінку відомими вченими, зокрема, проф. Дж. Дю Мондом (NIST, США) [22], який спеціально відвідав наш інститут для ознайомлення з цією роботою.

Роботи з визначення гіромагнітного відношення протона несподівано дали побічний, але надзвичайно важливий результат, в одержанні якого також взяли участь учені нашого інституту [14]. Цей результат полягав у використанні ефекту ЯМР для уточнення значення ампера, визначеного в SI за допомогою класичного методу ампер-вагів. Для розуміння цього результату розглянемо основні методи визначення гіромагнітного відношення протона за ефектом ЯМР.

Для визначення γ_p існує два типи експериментів: у слабкому і сильному магнітних полях. В одному з них величина γ_p порівнюється з геомагнітним полем (слабке поле), а в іншому – в тисячу разів перевищує його. В експерименті зі слабким полем ($B \sim 10^{-3}$ Тл) частота становить близько 50 кГц, а в експерименті з сильним полем ($B \sim 0,5$ Тл) вона дорівнює кільком мегагерцам. Але основна різниця між цими групами

полягає не в значенні магнітної індукції поля, а в підході до знаходження цього значення магнітної індукції.

Як відомо, при експериментах із визначення гіромагнітного відношення протона його чисельне значення знаходять із співвідношення

$$\gamma_p = \frac{2\pi f_{\text{ямр}}}{B} . \quad (5)$$

При визначенні $\gamma_p(lo)$ в слабкому магнітному полі джерелом магнітного поля є котушки (конттури) зі струмом без феромагнітних магнітопроводів. Магнітна індукція знаходиться розрахунковим шляхом за експериментальними вимірюваннями геометричних розмірів контурів і сили струму в провідниках контурів і з використанням формули (3).

При визначеннях $\gamma_p(hi)$ в сильних магнітних полях магнітна індукція знаходиться за результатами вимірювань сили взаємодії магнітного поля, в якому спостерігається ЯМР, з системою провідників (конттуру) зі струмом. Сила взаємодії вимірювалася за допомогою магнітних вагів через масу вантажу, що зрівноважує цю силу, за формулою

$$B = \frac{mg}{K_2 I} , \quad (6)$$

де m – маса зрівноважувального вантажу; g – прискорення вільного падіння; K_1, K_2 – коефіцієнти, що залежать від геометричних розмірів контурів зі струмом; I – сила струму в контурі.

Зазвичай береться прямокутна котушка, у якій розмір по вертикалі набагато перевищує горизонтальний розмір. Котушка підвішується таким чином, щоб її нижня горизонтальна частина була розташована в полі, а верхня – в області, де поле нехтовно мале. Для вимірювання котушку підвішують на коромисло вагів, а напруженість поля знаходять за відомим значенням сили і виміряної довжини горизонтальної частини котушки. На практиці необхідно контролювати розподіл поля вздовж всієї котушки і вносити поправку, що враховує залишкове поле на верхньому її кінці, або ж зводити залишкове поле до нуля за допомогою компенсуючих котушок, розташованих поза основного магніту.

Особливістю методу сильного поля, порівняно з методом слабого поля, є те, що при знаходженні $\gamma_p(hi)$ за формулами (5) і (6) сила струму I буде знаходитися в чисельнику виразу, а при знаходженні $\gamma_p(lo)$ за формулами (5) і (3) сила струму буде в знаменнику.

Поєднання цих двох методів лежить в основі модифікованого експерименту з ампер-вагами, в якому частота прецесії протона служить лише для перетворення слабого (обчислюваного) поля в сильне (вимірюване) поле. Якщо в експерименті зі слабким полем спостерігається вільна прецесія протонів, то в експерименті з сильним полем можна виявити явище поглинання енергії з поля, що створюється в детекторній котушці. Таким чином, поглинання відбувається на резонансній частоті.

Безпосередня мета визначень гіромагнітного відношення протона полягала в такому:

по-перше, одержати за сукупністю вимірювань $\gamma_p(hi)$ і $\gamma_p(lo)$ значення γ_p в одиницях SI, навіть якщо сила струму I вимірювалася в інших одиницях (наприклад, практичних);

по-друге, виразити сили струмів у контурах в одиницях SI шляхом порівняння результатів двох визначень γ_p , тобто фактично відтворити значення ампера за існуючою SI.

Принципову можливість цього було показано ще в 70-ті рр. вченими провідних метрологічних інститутів, у тому числі ХДНДІМ, а одержані результати було враховано при уточненні розміру ампера, про що сказано вище.

У США в NBS (так у ті роки називався національний метрологічний інститут – NIST) протягом декількох років за допомогою установки зі слабким полем проводилися регулярні перевірки стабільності відтворення значення ампера. Результати спостережень показали, що значення ампера, отримане за допомогою еталонних елементів і резисторів, протягом майже п'яти років змінювалося не більше ніж на 10^{-4} % [23]. Це показувало, що одиницю сили струму дійсно можна було задовільно реалізувати через частоту прецесії протонів в магнітному полі, яке підтримувалося в соленоді. У роботі [24] було зазначено, що якщо поєднати обидва методи визначення γ_p , то відпадає необхідність у використанні ампер-вагів для реалізації ампера.

Дійсно, при експерименті в слабкому магнітному полі $I_1 = (\omega_1 / \gamma_p) \cdot (I / K_1)$, в сильному полі $I_2 = (mg / K_2) \cdot (\omega_2 / \omega_2)$, де ω_1, ω_2 – частота ЯМР в слабкому і сильному полях відповідно.

Порівнюючи результати вимірювань у слабкому і сильному полях за умови $I_1 = I_2 = I$ (або точно відомого їх співвідношення), одержуємо

$$I = \sqrt{\frac{1}{\mu} \frac{\omega_1}{\omega_2} \frac{F}{K_1 K_2}} . \quad (7)$$

Таким чином, сумісне використання двох установок, які реалізують вимірювання в слабкому і сильному полях, дозволяє визначити розмір ампера в системі SI. Явище ЯМР у цьому експерименті використовувалося тільки як компаруючий метод, а числове значення гіромагнітного відношення протона в розрахунку не фігурує. Детальний аналіз похибок, проведений при виконанні цієї роботи, показав, що точність відтворення ампера цим методом вище, ніж традиційним на той час методом ампер-вагів. Це і дозволило внести відповідні уточнення в розмір ампера [14], про що було сказано вище.

Говорячи про значення ефекту ЯМР для метрології в світлі New SI, підкреслимо, що найважливішою сферою його використання вважаємо відтворення розміру одиниці магнітної індукції магнітного поля постійного струму. Альтернативний метод – використання розрахункової струмової котушки і відтво-

рення тесли за виразом (3) – потребує прецизійних розрахунків коефіцієнта K_K , де необхідно враховувати не тільки геометричні розміри й форму котушки, але і її розташування відносно напрямків векторів магнітної індукції джерела магнітного поля, розподілення магнітного поля вздовж провідників зі струмом тощо. Такі розрахунки можливі лише для добре відомих форм. Але і в таких конструкціях гіромагнітне відношення протона і ефект ЯМР використовуються для узгодження розміру тесли в різних піддіапазонах.

Ще однією сферою використання ефекту ЯМР є визначення з високою точністю відношення магнітних моментів речовин, які застосовуються на практиці, зокрема, дейтрона і протона, тритона і протона, ядра літія і протона тощо [25]. Ці дані важливі для досліджень у галузі молекулярної фізики і фізики рідини.

5. Результати сучасних досліджень і визначення гіромагнітного відношення

Як було зазначено вище, гіромагнітне відношення протона – одна з найважливіших сталих, яка в комбінації зі сталою Планка дозволяє визначити сталу тонкої структури α . Визначення сталої Планка h через електричні вимірювання відбувається таким чином: вимірювання сталої Джозефсона K_J в одиницях SI (Гц/В) визначає відношення $2e/h$, а зважаючи на те, що в системі SI швидкість світла c та магнітна стала μ_0 – точно відомі сталі, вимірювання сталої фон Клітцинга R_K в одиницях SI (Ом) визначає α . Крім того, зважаючи на те, що $K_J^2 R_K = 4/h$, вимірювання цього добутку в одиницях SI (Js)⁻¹ визначає h .

Зв'язок гіромагнітного відношення γ_x зв'язаної частки x зі спіновим квантовим числом i та магнітним моментом μ_x наведено в рівнянні

$$\gamma_x = \frac{2\pi f}{B} = \frac{\omega}{B} = \frac{|\mu_x|}{i\hbar}, \quad (8)$$

де f – частота прецесії спіна; ω – кутова частота прецесії ядра частки.

Для пов'язаного та екранованого протона p і геліона h (геліон – ядро легкого ізотопу гелію ³He, складається з двох протонів і нейтрона) рівняння (8) показує, що

$$\gamma_p = \frac{2\mu_p'}{\hbar}; \quad \gamma_h = \frac{2\mu_h'}{\hbar}, \quad (9)$$

де протони знаходяться у сферичному зразку чистої води (H₂O) при 25°C, оточеному вакуумом, а геліони – у сферичному зразку чистого гелію (³He) при низькому тиску та 25°C, який також оточено вакуумом.

Екрановане гіромагнітне відношення частки може бути визначено двома способами, але фактично виміряні величини відрізняються: спосіб слабого поля визначає $\gamma_x/K_J R_K$ (співвідношення (10)), у той час як спосіб сильного поля визначає $\gamma_x K_J R_K$ (співвідношення (11)):

$$\gamma_x' = \Gamma'_{x-90}(lo) \frac{K_J R_K}{K_{J-90} R_{K-90}}, \quad (10)$$

$$\gamma_x' = \Gamma'_{x-90}(hi) \frac{K_{J-90} R_{K-90}}{K_J R_K}, \quad (11)$$

де $\Gamma'_{x-90}(lo)$ та $\Gamma'_{x-90}(hi)$ є експериментальними величинами γ_x' в системі одиниць SI, які можуть бути отримані в результаті експериментів у слабкому та сильному полях відповідно.

В обох випадках сила електричного струму I вимірюється з використанням ефекту Джозефсона та квантового ефекту Холла з узгодженими значеннями постійних Джозефсона і фон Клітцинга.

Фактичні вхідні дані, які були використані в Узгодженні CODATA-2010, – це $\Gamma'_{x-90}(lo)$ та $\Gamma'_{x-90}(hi)$, тому що вони є величинами, фактично отриманими під час експериментів, але їхні значення, що бралися до уваги, пояснюють той факт, що $K_{J-90} \neq K_J$, а $R_{K-90} \neq R_K$.

Значення величин $\Gamma'_{p-90}(lo)$ які використовувалися в Узгодженні CODATA-2010, були отримані в Національному інституті стандартів та технологій США (NIST) [26], у Китайському національному інституті метрології (NIM) [27] та Корейському науково-дослідному інституті еталонів та науки (KRISS) спільно з дослідниками з ВНИИМ (Росія) [28–31]. Значення величини $\Gamma'_{p-90}(hi)$ були отримані в NIM [32] та Національній фізичній лабораторії (NPL) у Великій Британії [33].

Таким чином, дослідження, пов'язані з визначенням гіромагнітного відношення, продовжуються, і, як було зазначено раніше, в Узгодженні CODATA-2010 [11] наведено таке чисельне значення: $\gamma_p = 2\mu_p'/\hbar = 2,675222005(63) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1}$ з відносною стандартною невизначеністю $2,4 \cdot 10^{-8}$.

Висновки

1. На 24-му засіданні CGPM було проголошено проекти нових формулювань ряду основних одиниць і New SI, суть яких полягає у визначенні всіх основних одиниць SI через фізичні сталі і фіксації значень цих сталих. Введення New SI фактично буде означати, що базовими методами метрології стануть квантові ефекти, в яких фізичні сталі відіграють роль коефіцієнтів у рівняннях вимірювань.

2. Беручи до уваги таку тенденцію і незворотну перспективу впровадження New SI в метрологічну практику, доцільно розглянути роль такого квантового ефекту, як ядерний магнітний резонанс, на якому сьогодні базуються первинні еталони одиниці магнітної індукції, а також статус сталої – гіромагнітного відношення протона.

3. Аналіз показує, що відтворення одиниці магнітної індукції є фактично і відтворенням одиниці сили струму. Але одиниця сили струму в New SI вже прив'язана до фізичної сталої – елементарного заряду e . Це виключає можливість фіксації ще однієї сталої – гіромагнітного відношення протона, тобто статус цієї сталої є нижчим, ніж сталих h , e , k і N_A ,

які будуть зафіксовані в New SI, а також сталих ν_{Cs} (частота надтонкого переходу в цезії-133), c (швидкість світла) і $K (\lambda_{555})$ (спектральна сила світлового потоку), які вже зафіксовані в існуючій SI.

4. Остання обставина в жодному разі не знижує значення методу з використанням ЯМР і сталої γ_p для відтворення одиниці магнітної індукції – тесли, який залишається найбільш точним з відомих методів. Однак стала γ_p повинна використовуватися з тією похибкою, яка встановлюється в Узгодженнях CODATA.

5. Таким чином, метод ЯМР, який спочатку використовувався для визначення сталої γ_p , у подальшому зіграв значну роль як самий надійний спосіб перевірки стабільності еталона ампера і в уточненні розміру одиниці струму в SI, відтворенні одиниці магнітної індукції.

6. Оскільки гіромагнітне відношення дозволяє визначати сталу тонкої структури і використовується при узгодженні інших сталих, експерименти з його визначення залишаються перспективними для вирішення метрологічних завдань сучасності.

Список літератури

1. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля: предполагаемый подход к применению Рекомендации 1 МКМВ (С1-2005) / Я. М. Миллс, П. Дж. Мор, Т.Дж. Квинн [и др.] // Метрология. – 2007. – № 2. – С. 5–57 (Mills J.M. [et al.] // Metrologia. – 2006. – V. 43. – № 44. – P. 227).
2. http://www.bipm.org/utis/common/pdf/24_CGPM_Resolutions.pdf
3. Неєжмаков П.І. Реформа SI і перебудова системи еталонів електричних одиниць / П.І. Неєжмаков, Ю.Ф. Павленко, Н.М. Маслова // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 1. – С. 3–13.
4. Likharev K. // J. Low Temp. Phys / K. Likharev, A. Zorin. – 1985. – V. 59. – p. 347.
5. Purcell, Torrey, Paund // Phys. Rev. Mod. Phys. – 1946. – V. 18. – p. 323.
6. Bloch, Hansen, Packard // Phys. Rev. – 1946. – V. 69. – p. 127.
7. <http://www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/1/>
8. <http://www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/2/>
9. <http://www.bipm.org/en/committees/cipm/cipm-2000.html>
10. Каршенбойм С.Г. О переопределении килограмма и ампера в терминах фундаментальных физических констант / С.Г. Каршенбойм // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 9. – С. 975–982.
11. http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gamma|search_for=atomnuc/
12. Державний спеціальний еталон одиниці магнітної індукції / В.И. Зингерман, Я. А. Зильберштейн, О.Ю. Багалій [та ін.] // Український метрологічний журнал. – 1996. – Вип. 2, 3. – С. 36–40.
13. Ягола Г.К. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции в диапазоне 1–10 Тл / Г.К. Ягола, Ю.Н. Казанцев // Измерительная техника. – 1986. – № 8. – С. 3–4.
14. Зингерман В.И. Некоторые вопросы использования физических констант для воспроизведения электрических и магнитных единиц измерения / В.И. Зингерман, М.С. Лизогуб // Измерительная техника. – 1973. – № 1. – С. 18–20.
15. Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции / К.К. Барахин, С.В. Баунин, В.Л. Русанова [и др.] // Измерительная техника. – 1981. – № 7. – С. 6–8.
16. Государственный первичный эталон единиц магнитных величин – магнитной индукции, магнитного потока и их отношения / В.Н. Калябин, В.Е. Чернышев, В.Н. Хорев [и др.] // Измерительная техника. – 1991. – № 10. – С. 3–5.
17. Ягола Г.К. Определение значения гиромангнитного отношения протона / Г.К. Ягола, В.И. Зингерман, В.Н. Сепетый // Измерительная техника. – 1962. – № 5. – С. 24.
18. Ягола Г.К. Определение точного значения гиромангнитного отношения протона в сильных магнитных полях / Г.К. Ягола, В.И. Зингерман, В.Н. Сепетый // Измерительная техника. – 1966. – № 7. – С. 44–47.
19. Taylor B.N., Parker W.H., Langenberg D.N. // Rev. Mod. Phys. – 1969. – № 41 (3). – P. 375–496.
20. Cohen E.R., Taylor B.N. // Phys. Chem. Ref. – 1973. – Data 2(4). – P. 663–734.
21. Cohen E.R., Taylor B.N. // Rev. Mod. Phys. – 1987. – № 59 (4). – 1987. – P. 1121–1148.
22. Дю Монд Дж. Сверхточные измерения универсальных постоянных физики / Дж. Дю Монд // Наука и человечество: сб. – М.: Знание, 1964.
23. Cutkosky R.D., Driscoll R.L. // Com. Int. Poids Mes.: Proc. Verb. Com. Consult Elec. 9e Session, Gauthier-Villars. – Paris, 1961. – P. 33–35.
24. Vigoureux P. // Precision Measurement and Fundamental Constants, ed. Langenberg and B.N. Taylor. – NBS, Washington, 1971. – P. 111–115.
25. Неронов Ю.И. Определение отношения магнитных моментов дейтрона и протона с погрешностью $1,7 \cdot 10^{-7}\%$ / Ю.И. Неронов // Проблемы квантовой метрологии: I Всесоюзное совещание: материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 28–34.
26. Williams E.R., Jones G.R. [et al.] // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1989. – P. 38–233.
27. Liu R. [et al.] // Acta Metrol. – 1995. – Sin. 16. – P. 161.
28. Shifrin V.Y., Khorev V.N., Park P. G. [et al.] // Izmeritel'naya Tekhnika. – 1998. – P. 68.
29. Shifrin V.Y., Park P.G., Khorev V. N. // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1998. – 47. – P. 638.
30. Shifrin V.Y., Park P.G., Khorev V. N. [et al.] // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1999. – 48. – P. 196.
31. Park P.G., Choi C.H., Kim C.S. [et al.] // J. Korean Phys. Soc. – 1999. – 34. – P. 327.
32. Liu W. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1999. – 82. – P. 711.
33. Kibble B.P., Hunt G.J. // Metrologia. – 1979. – 15. – P. 5.