

Харківський національний університет радіоелектроніки
Кафедра метрології та технічної експертизи

SI 2019 р. і державні еталони України
Короткий довідник

Зміст

Вступ	2
1. Реформа SI 2019 р.	3
2. Одиниці простору і часу	10
3. Одиниці електричних величин	13
4. Кілограм і моль	28
5. Кельвін	31
6. Кандела	34
Підсумок	37
Додаток: Державні еталони України	39
Список літератури	47

Харків – ХНУРЕ – 2020

Вступ

Даний довідник є коротким викладенням суті реформи Міжнародної системи одиниць, яка відбулась у 2018 р. і введена у дію з травня 2019 р. (SI-2019). Особлива увага приділяється методам відтворення основних одиниць, які одержали нове визначення, а також одиниць електричних і магнітних величин у SI-2019. Довідник призначено для вивчення курсу «Державні еталони України», оскільки в основних підручниках з цього курсу (джерела 7 і 8 списку літератури) не в повній мірі показані ті зміни, які відбуваються в результаті реформи SI-2019. Довідник містить також Додаток, в якому надано основні відомості про існуючі державні еталони України.

РОЗДІЛ 1

Реформа міжнародної системи одиниць SI 2019 року

1.1 Передумови проведення реформи SI

Міжнародна система одиниць (SI) є всесвітньою системою вимірювань, яка використовується в науці, техніці, торгівлі й побуті. Походження SI пов'язане з підписанням у 1875 р. уповноваженими представниками 17-ти держав Дипломатичного договору – Метричної Конвенції для забезпечення «міжнародної уніфікації та вдосконалення Метричної системи».

Хоча система SI існує багато років, вона постійно розвивається і уточнюється.. Основною тенденцією цих змін є наближення визначень одиниць до природних інваріантів і посилення зв'язку з фундаментальними сталими як істинними еталонів природи [1].

На початку XXI століття тільки секунда і метр були напряму пов'язані з істинними інваріантами, оскільки секунда визначається через період, що відповідає частоті надтонкого переходу цезію-133, а метр – через швидкість світла у вакуумі

Одиниця сили світла кандела хоч і не була прив'язана до фундаментальної сталої, але спирається на природний інваріант – спектральну силу світлового потоку монохроматичного випромінювання з частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц (частота найкращого бачення людського зору), яка точно дорівнює 683 лм/вт.

Не зовсім нормальний стан багато років існував у **електричних вимірюваннях**, де вони були прив'язані до механічних вимірювань. Відкриття в період 1945–1980 рр. макроскопічних квантових ефектів: ядерного магнітного резонансу [2], ефекту Джозефсона [3], квантового ефекту Холла [4] – привело до революції в електричній метрології. Але перевизначення ампера у квантових величинах не було зроблено через небезпідставні побоювання порушити цільність системи SI. У той же час на рівні ГКМВ було рекомендовано з 1990 р. здійснювати на практиці відтворення вольт, ома в національних еталонах на

основі квантових ефектів. Ці електричні одиниці одержали назву «практичних». Таким чином, виник дуалізм у визначеннях електричних одиниць,

Кельвін визначався на основі точно заданого термодинамічного стану води (через потрійну точку води $T_{\text{пТВ}}$), яка має термодинамічну температуру, значною мірою залежну від вмісту домішок та ізотопного складу даного об'єму води, тобто строго кажучи, є артефактом. На обговорення була винесена пропозиція визначати кельвін через сталу Больцмана k , використовуючи співвідношення $Q = k T_{\text{пТВ}}$, де Q – теплова енергія = const.

Визначення інших основних одиниць мало ще більш серйозні недоліки. Кілограм визначався за допомогою «артефакту» – платино-іридієвого прототипу (ІРК). Його маса, як відомо, дрейфує по відношенню до істинного інваріанту, однак цей дрейф фактично неможливо оцінити,

Сукупність цих факторів призвела до того, що після тривалого обговорення 26-й ГКМВ (2018 р.) прийняла рішення про введення Нової SI з 20 травня 2019 р.

1.2 Суть реформи SI-2019

Найбільш складним завданням виявилось розробка принципів відтворення природного кілограма і створення відповідного еталона. Як відомо, розглядались і ретельно обговорювались два основних методи реалізації природного кілограма: через електричні вимірювання і простежуваність до сталої Планка («електричний» кілограм) і через атомну вагу і кількість атомів з простежуваністю до сталої Авогадро («атомний» кілограм). Перевагу було надано визначенню через сталу Планка.

Широку дискусію викликало питання про перевизначення одиниці температури – кельвіна, яке було самим неоднозначним. В кінці кінців було прийнято визначення через сталу Больцмана.

Ще одним дискусійним питанням була форма подання нових визначень основних одиниць: у явному вигляді чи через сталі. Перевагу було віддано визначенням через сталі, що відповідало філософії Реформи.

26-та ГКМВ (2018 р.) прийняла остаточне рішення щодо нових визначень основних одиниць і введення їх у дію з 20 травня 2019 р. Наводимо витяг з Резолюції А 26-ї ГКМВ 2018 р., а також Додаток 1 [5]:

Міжнародна система одиниць (SI) – це система одиниць, у якій:

- частота переходу між двома рівнями надтонкої структури цезію-133 в основному стані, $\Delta\nu_{Cs}$, дорівнює 9 192 631 770 Гц,
- швидкість світла у вакуумі, c , дорівнює 299 792 458 м/с,
- стала Планка, h , дорівнює $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ Дж·с,
- елементарний електричний заряд, e , дорівнює $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ Кл,
- стала Больцмана, k , дорівнює $1,380\,649 \times 10^{-23}$ Дж/К,
- стала Авогадро, N_A , дорівнює $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ моль⁻¹,
- світлова ефективність монохроматичного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц, K_{cd} , дорівнює 683 лм/Вт,

Додаток 1. Основні одиниці SI

- **секунда**, символ s , є одиницею вимірювання часу в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення частоти переходу між двома рівнями надтонкої структури цезію-133 в основному стані, $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$, коли її виражено через одиницю Гц, що дорівнює s^{-1} .
- **метр**, символ m , є одиницею вимірювання довжини в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення швидкості світла у вакуумі, $c = 299\,792\,458$, коли її виражено через одиницю м/с,
- **кілограм**, символ kg , є одиницею вимірювання маси в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення сталої Планка, $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, коли її виражено через одиницю Дж·с,
- **ампер**, символ A , є одиницею вимірювання електричного струму в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення елементарного заряду, $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, коли його виражено через одиницю Кл,
- **кельвін**, символ K , є одиницею вимірювання термодинамічної температури в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення сталої Больцмана, $k = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ Дж·К⁻¹.

- **моль**, символ моль, є одиницею вимірювання кількості речовини в SI. Один моль містить $6\,022\,140\,76 \times 10^{23}$ елементарних частинок. Величина моля є фіксованим числовим значенням сталої Авогадро, N_A , коли її виражено через одиницю моль^{-1} , і називається числом Авогадро.

- **Кандела**, символ кд, є одиницею вимірювання сили світла в заданому напрямку в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення світлової ефективності монохроматичного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц, $K_{\text{кд}} = 683$, коли її виражено одиницею $\text{лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$,

Нові визначення значною мірою відходять від способу явних визначень основних одиниць SI. Неважко, однак, бачити, що нові визначення **секунди**, **метра** і **кандели** адекватні їх визначенням у попередній версії SI і відрізняються лише формулюваннями, в той час як **кілограм**, **ампер**, **кельвін** і **моль** одержують принципово інше підґрунтя.

1.3 Квантова фізика – методична основа Нової SI

Як видно з структури і формулювань Нової SI, її філософія побудована на використанні фізичних сталих, як еталонів природи, і квантової фізики, як методичної основи

Прагнення виразити одиниці вимірювань через ФФС, як істинні природні інваріанти, сформувалося не зараз. Його ще в XIX столітті висловив Дж. К. Максвелл в своєму виступі перед Британською асоціацією науки (1870 р.). Його пророцтво здійснилось і стало філософією Нової SI – квантової SI [5].

Основні постулати квантової фізики

- Квантова фізика – фізика мікросвіту.

- Всупереч існуючому у класичній фізиці уявленню про неперервність процесів випромінювання і поглинання електромагнітних хвиль (і світла), має місце *квантування*, тобто випромінювання і поглинання енергії певними порціями – *квантами (фотонами)*.

- Явище квантування розповсюджується не тільки на випромінювання, а й на *частинки*, зокрема, електрон. Але квантування не спростовує *хвильову*

природу явищ, тобто має місце *дуалізм*. Подвійна природа принципово носить універсальний характер. Вона породжує таку особливість мікросвіту як *дискретність* (енергії, частоти, моменту, орбіт, спектра тощо).

- Найбільш прийнятною моделлю атома виявилась *планетарна модель* Бора, а також його постулати.

- Одним з основних принципів квантової фізики є принцип *співвідношення невизначеностей* Гайзенберга, з якого витікає *ймовірнісний* характер явищ мікросвіту.

- Єдність і відсутність протиріч між квантовою і класичною фізикою підкреслюється *принципом відповідності* Бора : між будь-якою фізичною теорією, яка є узагальненням і розвитком класичної, і первинною класичною теорією існує зв'язок – в певних граничних випадках нова теорія повинна переходити в попередню (первинну).

- Основним фізико-математичним апаратом квантової фізики є квантова формула *Планка*, теорія атома *Бора*, хвильова теорія *де Бройля*, хвильова функція *Шредінгера*, принцип невизначеності *Гайзенберга*, принцип *Паулі*, принцип відповідності *Бора*

- В мікросвіті можливі явища, які не можуть бути пояснені з точки зору класичної фізики: *квантування*, *тунелювання* електронів, поєднання в *куперівські пари*, *надпровідність* і *надплинність*. Ці явища лежать в основі ряду *макроскопічних квантових ефектів*, які знайшли використання в метрології.

Названі вище *мікроскопічні* квантові явища є підґрунтям, на якому були відкриті **макроскопічні** квантові ефекти, які стали основою методології квантової метрології. Так, мікроскопічний ефект *квантового переходу* в атомах цезію-133, що супроводжується випромінюванням або поглинанням кванту e/h енергії, став основою *макроскопічного ефекту* – стабілізації частоти цезієвого репера і створення первинного еталона часу-частоти. На основі цього ефекту були створені інші квантові генератори радіо- і оптичного діапазонів, еталони часу і довжини.

Інші мікроскопічні квантові явища – поєднання електронів у куперівські пари, *тунелювання* електронів через потенційний бар'єр, *надпровідність* - привели до відкриття макроскопічного квантового **ефекту Джозефсона** (і створення на його основі еталонів напруги). Також на явищі тунелювання електронів ґрунтується макроскопічний ефект **«одноелектронного тунелювання»**, який використовується для відтворення одиниці сили струму.

Ще одним ефектом, який пояснюється лише з позицій квантової механіки, є *квантування електричного опору* в «двовимірних структурах» типу метал – діелектрик – напівпровідник (в умовах низьких температур і сильного магнітного поля) – **квантовий ефект Холла (КЕХ)**. Використання цього ефекту дозволило отримати реперні значення електричного опору і створити квантовий еталон ома [6].

При збігу частоти зовнішнього опромінювання з частотою прецесії ядра атома речовини, поміщеної в магнітне поле, має місце макроскопічний ефект **ядерного магнітного резонансу (ЯМР)**, який супроводжується атомним переходом і випромінюванням (поглинанням) енергії. На базі цього ефекту вдалося вирішити цілий ряд метрологічних задач, які будуть розглянуті нижче.

До макроскопічних квантових ефектів відноситься також **фотоелектричний ефект (фотоефект)**, який полягає у «вириванні» електронів у твердих і рідких тіл під дією світла. Фотоефект знайшов використання в оптичних вимірюваннях.

Наслідки введення Нової SI

1. Розміри одиниць Нової SI-2019 не змінюються.
2. Система одиниць позбавляється останніх еталонів-артефактів (платино-іридієвого кілограма і чарунки «потрійна точка води») і стає дійсно *природною* системою.
3. Перехід на визначення кельвіна через сталу Больцмана не приведе у найближчі роки до зменшення значення МТШ-90 , але ця шкала перестане бути єдиною основою термометрії. Перевизначення кельвіна приведе до поширення і удосконалення методів *первинної термометрії*.

4. Визначення ампера буде відповідати методиці його практичної реалізації – через квантові ефекти.

5. Зміни в СІ не ведуть до суттєвих наслідків в процедурах і результатах *практичної метрології*, але будуть сприяти подальшому впровадженню більш точних методів, зокрема, квантових.

Відтворення основних одиниць у Новій СІ

Основна одиниця	Стала, до якої простежується одиниця	Первинний (референтний) метод відтворення	Основна апаратура
Секунда	ν_{CS} – частота переходу поміж надтонкими рівнями атома цезію-133	Квантовий перехід в атомі цезія-133	Цезієвий репер
Метр	c_0 – швидкість світла	Генерування монохроматичного когерентного світлового випромінення та вимірювання його частоти: $L=c_0/f_n$	Високостабільний лазер і вимірювач його частоти
Ампер	e – елементарний заряд	1. Закон Ома і квантові ефекти Джозефсона і Холла; $I = \frac{U_j}{R_x}$ – напруга Джозефсона – Холлівський опір 2. Одноелектронне (SET) - тунелювання	1. Міри, простежувані до сталих Джозефсона і Клітцинга (квантовий ефект Холла), струмовий компаратор 2. SET-насос
Кілограм	h – стала Планка	Порівняння $P_{ел}=P_{мех}$, вимірювання $P_{ел}$ через квантові ефекти Джозефсона і Холла	Ват-ваги; міри, простежувані до сталих Джозефсона і Клітцинга
Кельвін	k – стала Больцмана	Методи первинної термометрії	Первинні термометри
Кандела	$k(\lambda_{555})$ – спектральна сила світла частотою 540×10^{12} Гц	1. Властивості випромінення абсолютно чорного тіла 2. Використання явища фотоефекту 3. Радіометрія	1. Випромінювач типу АЧТ 2. Приймач-фотометр зі 100%-ною квантовою ефективністю 3. Приймач-радіометр
Моль	N_A – стала Авогадро	Еталон не створюється	–

РОЗДІЛ 2

Відтворення одиниць простору і часу

Сучасна фізика розглядає простір і час як єдиний просторово-часовий континуум, одиниці якого **секунда і метр** пов'язані. Але так було не завжди, кожна з них пройшла свій шлях

2.1. Секунда: Коротка історія і сучасний стан відтворення

Основна одиниця часо-частотних вимірювань **секунда** в метричній системі спочатку визначалась через астрономічні явища: як певна частина сонячної доби (до 1960 р.), потім як частина тропічного року, а з 1967 р. – через частоту квантового явища – *переходу між двома рівнями надтонкої структури цезію-133*.

У Новій SI-2019 визначення секунди принципово не змінюється у порівнянні з останнім визначеннями у SI, тому і методологія її відтворення на цей час залишається незмінною, але постійно удосконалюється в технологічному і апаратурному планах.

Первинним референтним методом відтворення секунди, у відповідності до визначення, є метод з використанням *частоти квантового переходу в цезії, а первинним еталоном - еталон, побудований на основі цезієвого репера*. Вважається, що потенціал точності репера класичного пучкового типу знаходиться в одиницях 14-го знаку (10^{-14}).

Окрім цезієвих в первинних еталонах використовуються також *і водневі стандарти часу-частоти*.

Щодо *первинного еталона* одиниць часу і частоти, його функціональні можливості мають бути значно ширшими за відтворення секунди, тому до їх складу, як правило, входять такі основні системи:

Апаратура відтворення та зберігання одиниці часу;

Апаратура формування і зберігання шкал часу і еталонних частот;

Системи внутрішніх та зовнішніх звірень;

Апаратура забезпечення роботи еталона.

Такий склад має і ДПЕ України. Він забезпечує такі основні характеристики:

- діапазон відтворених значень інтервалів часу становить від $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^8$ с, частоти – від 1 до $7 \cdot 10^{10}$ Гц;
- стандартна невизначеність за типом А – не більше $5 \cdot 10^{-14}$ (фактично $5 \cdot 10^{-15}$), за типом В – не більше $1 \cdot 10^{-13}$ (фактично $1 \cdot 10^{-14}$).

За складом, метрологічними характеристиками і функціональними можливостями еталон України знаходиться на сучасному рівні.

Перспективні технології відтворення секунди

Поєднання ідей цезієвого репера вертикальної конструкції і лазерного охолодження привело до створення в ряді країн еталону типу «цезієвого фонтану». Цей еталон має значно меншу нестабільність частоти за рахунок зниження практично до нуля теплового руху атомів (близько $1 \cdot 10^{-16}$).

Але ще більш перспективними вважаються стандарти частоти, що працюють не в радіочастотному, а в *оптичному* діапазоні. що на кілька порядків перевищує робочу частоту цезієвих стандартів. Стабільність різних ОСЧ підтверджена на рівні від $1 \cdot 10^{-17}$ до $1 \cdot 10^{-18}$.

2.2 Метр: коротка історія і сучасний первинний еталон

Свій шлях пройшло і визначення **метра**. При прийнятті Метричної конвенції *метр* був визначений як одна десятимільйонна частина чверті Паризького меридіану, і був матеріалізований у вигляді платинової лінійки. Потім еталонами метра були платино-іридієвий стрижень Х-подібного перерізу (до 1927 р.), певна кількість довжин хвиль різних джерел випромінення – *кадмію* (з 1927 до 1960 р.), *криптон*у (з 1960 до 1983 р) і, нарешті, *світла*, швидкість якого у вакуумі є фундаментальною сталою і прийнята 299792458 м/с точно (без похибки).

Нова SI не змінила за суттю існуюче визначення метра, забезпечуючи таким чином незмінність одиниці довжини в системах SI і SI-2019.

У самому загальному вигляді схема первинного еталона довжини має вигляд, наведений на рис. 1.

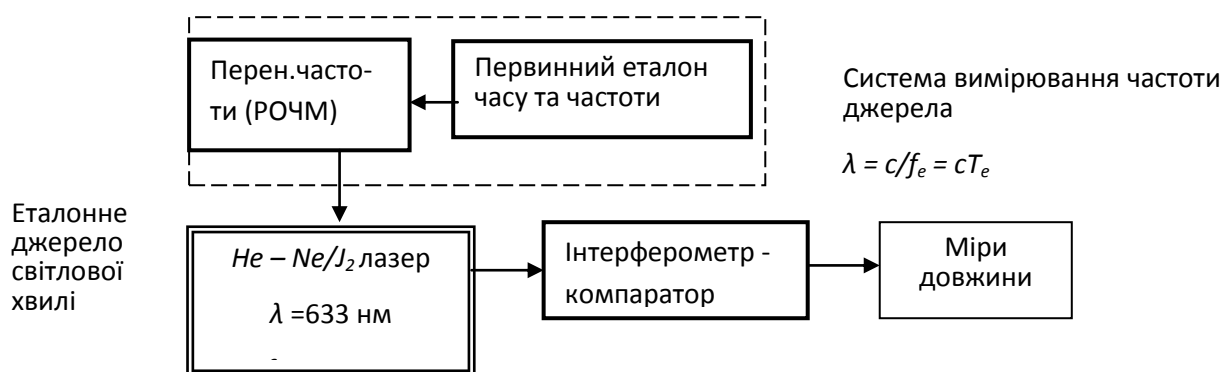


Рисунок 1 – Спрощена схема еталона часу-частоти-довжини

Як бачимо, носієм еталонної довжини в цій схемі є *довжина світлової хвилі лазера* $\lambda = c_0/f_e = c_0T_e$, частота якого вимірюється шляхом зв'язку з еталоном часу-частоти, а розмір одиниці передається мірам довжини за допомогою інтерферометра-компаратора

Складним питанням у цьому еталоні, який являє собою **єдиний еталон часу-частоти-довжини**, є вимірювання абсолютного значення частоти стабілізованого лазера He-Ne/J₂ з необхідною точністю. Найбільш перспективним вважається метод з використанням «*частотної гребінки*» спектра випромінювання лазерів надкоротких (фемтосекундних) імпульсів для зв'язку з еталоном часу-частоти (лише кілька країн володіють відповідними технологіями).

Спектр випромінювання такого лазера являє собою дискретний еквідистантний спектр – свого роду частотну лінійку, що простирається аж до оптичного діапазону. Це дозволяє вимірювати абсолютні значення частот випромінювання стандартів частоти оптичного діапазону

Державний первинний еталон одиниці довжини України в принциповому плані створений за схемою, наведеною на рис. і має діапазон вимірювань – від 0 до 10 м; стандартну невизначеність $2,5 \cdot 10^{-11}$.

Напрямами подальшого удосконалення еталонів *часу-частоти-довжини* є створення квантових стандартів частоти в *оптичному діапазоні* і впровадження метода «*частотної гребінки*» для вимірювання частоти в цьому діапазоні.

РОЗДІЛ 3

Одиниці електричних величин

3.1 Коротка історія

Як відомо, в електричних вимірюваннях протягом ряду років після визнання їх, як окремого виду вимірювань (початок 20 сторіччя), не було знайдено жодного природного явища або ефекту, який міг би стати підґрунтям для електричних одиниць. Тому з самого початку метрологія в електриці розвивалася шляхом порівняння з механічними явищами і одиницями, що стримувало її розвиток.. Але відкриття макроскопічних квантових ефектів *ядерного магнітного резонансу* (1946 р.) [2], *тунелювання* електронів через тонкий шар діелектрика між двома надпровідниками (1964 р. ефект Джозефсона), нарешті, ефекту *квантування* електричного опору в умовах наднизьких температур і сильного магнітного поля (1980 р., Клітцинг [4]) зробили революцію в електричній метрології.

У 1990 р., як сказано вище, було рекомендовано здійснювати на практиці відтворення вольта, ома на основі квантових ефектів. Такий підхід одержав назву *практичної* системи.

З 2019 р у SI діє визначення основної одиниці від електрики – ампер через *значення елементарного заряду*, що покінчило з дуалізмом і розв'язало всі протиріччя, пов'язані з використанням квантових методів.

В електриці, крім ампера, застосовується також ряд похідних одиниць

Консультативні комітети з видів вимірювання при МКМВ розробили короткі практичні рекомендації з методів реалізації одиниць в Новій SI – *Mise en pratique (MeP)*.

3.2 Реалізація у SI-2019

Наводимо рекомендації MeP (таблиця 1).

*На практиці **ампер (А)** може бути реалізований:*

а) за допомогою закону Ома $A = V/\text{Ом}$, а також за допомогою практичних реалізацій похідних одиниць системи SI вольт V і ома Ом на основі ефекту Джозефсона і квантового ефекту Холла відповідно, як описано нижче в п. 2 і 3; або

б) за допомогою одноелектронного тунелювання (SET) або аналогічного способу, виразу одиниці $A = \text{Кл/с}$, значення e , наведеного у рівнянні (2), і практичної реалізації основної одиниці системи SI секунди, s ;

Вольт V може бути реалізований за допомогою ефекту Джозефсона і зафіксованих значень сталої Планка і елементарного заряду:

Ом може бути реалізований за допомогою квантового ефекту Холла і зафіксованих значень сталої Планка і елементарного заряду:

Фарад Φ може бути реалізований: за допомогою звірення імпедансу відомого опору, отриманого за використання квантового ефекту Холла, з опором невідомої ємності з використанням, наприклад, квадратурного моста;

Генрі Гн може бути реалізований за допомогою звірення імпедансу невідомої індуктивності з імпедансом відомої ємності за допомогою відомих опорів з використанням, наприклад, мосту Максвелла-Віна, де відомі ємність і опір були визначені, наприклад, за використання квантового ефекту Холла;

Тесла Тл може бути реалізована

а) за допомогою соленоїда, котушки Гельмгольца або іншої конфігурації провідників відомих розмірів, що проводять електричний струм, і значення магнітної сталої μ_0 ,

б) за допомогою ядерного магнітного резонансу (ЯМР) з використанням зразка з відомим гіромагнітним відношенням, наприклад, сферичного зразка чистої H_2O при 25°C і найсучаснішого рекомендованого значення гіромагнітного відношення протона γ'_p , наведеного КОДАТА.

Таблиця 1 – Відтворення одиниць електричних величин

Величина, одиниця	Первинний метод	Рівняння вимірювань	min невизначеність
Напруга, В	Ефект Джозефсона	$U_j = n \frac{h}{2e} f_j$	10^{-10}
Електричний опір, Ом	Квантовий ефект Холла	$R_x = \frac{h}{me^2}$	10^{-9}
Струм, А	Закон Ома	$I = \frac{U_j}{R_x} = n m e f_j$	10^{-8}
	SET-тунелювання	$I = e f_T$	10^{-8}
Ємність, Ф	Розрахунковий конденсатор	$c = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} \cdot L_k$	10^{-6}
	Квадратурний міст	$c = \frac{1}{R_x 2\pi f}$	10^{-8}
Індуктивність, Гн	КЕХ, квадратурний міст	$L = \frac{R_x}{2\pi f}$	10^{-8}
Магнітна індукція, Тл	Розрахунковий	$B = k_B J$	10^{-6}
	Ядерний магнітний резонанс	$B = \frac{2\pi f}{\gamma_p}$	10^{-6}

Враховуючи, що перший рекомендований метод відтворення *ампера* реалізується через *вольт і ом*, розглянемо реалізацію вольта.

3.3 Ефект Джозефсона і реалізація вольта

Рекомендований МЕР ефект Джозефсона ґрунтується на таких квантових явищах як *надпровідність, тунелювання* електронів і поєднання їх у «куперівські пари», квантовий перехід. Докладно ефект Джозефсона і апаратура для його реалізації викладені в [7, 8].

Основним рівнянням, за яким відтворюється джозефсонівська напруга U_j , є:

$$U_j = (n h/2e) f_j$$

де h – стала Планка, e – елементарний заряд, f_j – частота опромінення, n – номер

сходинок вольтамперної характеристики контакту Джозефсона (КД).

Відношення $\frac{2e}{h}$ одержало назву сталої Джозефсона K_J .

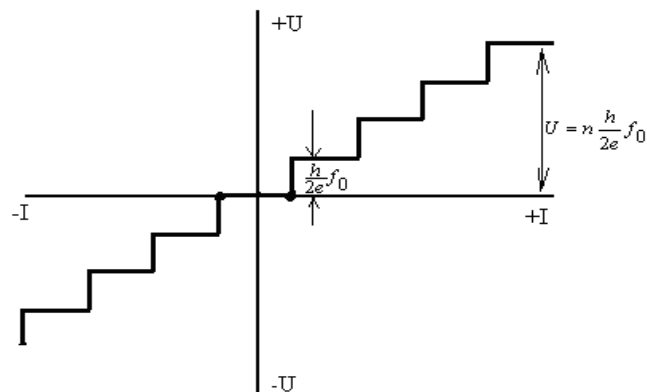


Рисунок 2 – Квантована вольтамперна характеристика КД

Еталони на ефекті Джозефсона створюються, в принциповому плані, в усіх країнах за єдиною схемою (рис. 3), що включає до себе *систему відтворення розміру вольт* (джерело джозефсонівської напруги), яка відіграє роль калібрувальника еталона, і *систему зберігання розміру одиниці* (високостабільні міри напруги постійного струму), а також пристрій порівняння цих напруг (компаратор).

Спрощена схема джерела Джозефсонівської напруги наведена на рис. 4.

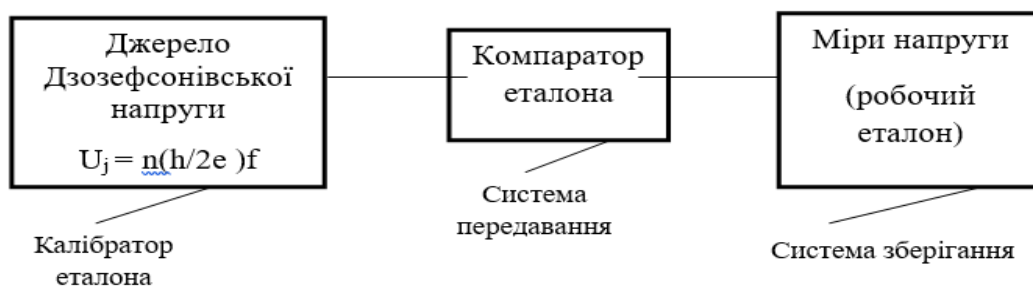


Рисунок 3 – Спрощена структурна схема еталона

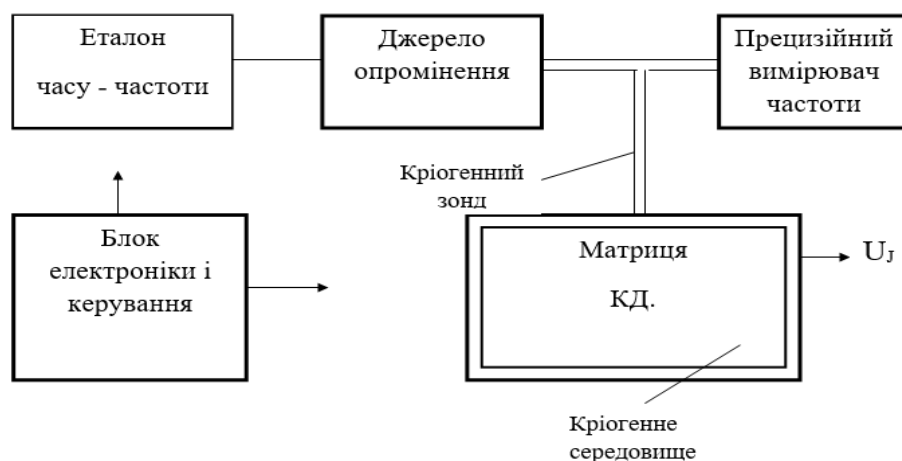


Рисунок 4 – Джерело Джозефсонівської напруги

Створені інтегральні схеми (матриці), що включали до себе кілька тисяч послідовно з'єднаних контактів Джозефсона. дозволяють відтворювати безпосередньо напругу в 1 В і більше при частоті опромінення $f \sim 70$ ГГц.

Таким чином, напруга постійного струму відтворюється через частоту і ФФС. Оскільки частота опромінення може бути зроблена достатньо стабільною і вимірюватися з необхідною точністю, а значення ФФС зафіксовані, метод Джозефсона дозволяє забезпечити дуже високу точність відтворення напруги і калібрування мір (до 10^{-10} при вихідній напрузі постійного струму до 10 В).

Україна (ННЦ «Інститут метрології») створила свій первинний еталон постійної напруги на основі ефекта Джозефсона.

Еталон має сумарну стандартну відносну невизначеність $(5-10) \cdot 10^{-10}$ при вихідній напрузі постійного струму до 10 В.

3.4. Квантовий ефект Холла і параметри електричних кіл

Приблизно до 80-х років минулого століття параметри електричних кіл - *активний опір R , електрична ємність C і індуктивність L* визначалися *розрахунковими* методами через геометричні розміри відповідних пристроїв: резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності.

Відомо, що параметри імпедансу електричних кіл – активний опір R , ємнісний опір $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ і індуктивний опір $Z_L = j\omega L$ – можуть бути пов'язані між собою за допомогою змінного струму з відомою частотою і так званого *квадратурного моста*, за допомогою якого встановлюється рівність імпедансів, що знаходяться у різних фазах або у протифазах

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

До відкриття квантового ефекту Холла (КЕХ), кожний з цих імпедансів по чергово слугував опорною точкою для відтворення інших. Найбільшу точність забезпечувала *розрахункова ємність C_p* . [7].

З 1980 р. електричний опір відтворюється за допомогою *квантового ефекта Холла*, спочатку в межах практичної системи електричних одиниць, а з 2019 р. – в межах SI -2019.

«Класичний» і «квантовий» ефекти Холла

Класичний або звичайний ефект Холла полягає в тому, що у металі або в напівпровідникові зі струмом, який поміщено в магнітне поле, перпендикулярне до вектора напрямку струму, під дією сили Лоренца виникає поперечне електричне поле і різниця потенціалів – ЕРС Холла E_x .

У 1980 р. німецький фізик *Клітцинг* виявив, що холлівський опір при температурі, близькій до абсолютного нуля ($T \leq 1,5$ К, режим надпровідності), і сильному магнітному полі ($B > 3$ Тл) набуває дискретних значень. На залежності R_x від щільності електронів (рис. 5), яка при звичайному ефекті Холла має монотонний характер (крива а), виникають серії плато, тобто має місце *квантування опору* [7, 8].

Було також виявлено, що значення холлівського опору на плато з високою точністю дорівнюють відношенню:

$$R_x = \frac{h}{e^2 n} ,$$

де $\frac{h}{e^2} = R_K$ – стала Клітцинга; $m = 1, 2, 3, \dots$

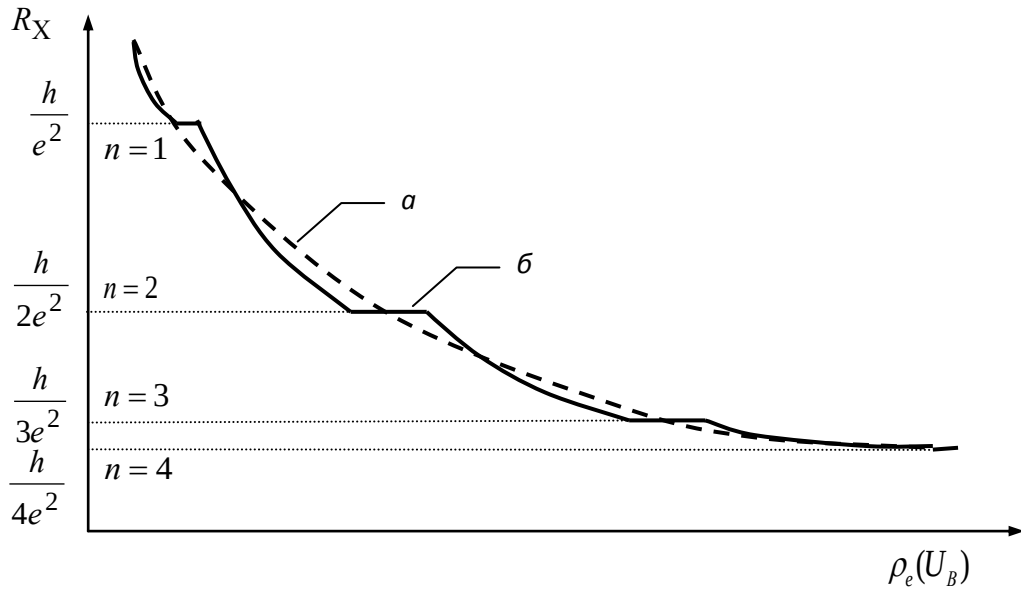


Рисунок 5 – Залежність холлівського опору від щільності електронів у каналі

Ефект спостерігався в так званих «*двовимірних електронних системах*», в яких електрон може рухатись лише у двох вимірах. До них відносяться структури типу *метал–діелектрик–напівпровідник (МДН)*, а також спеціальні пристрої, які одержали назву *гетероструктур*.

Це відкрило можливість використання квантованого холлівського опору, «прив'язаного» до значення $\frac{h}{e^2}$, як *еталона електричного опору*.

З практичних міркувань номер плато (сходинки) вибирається парним (2 чи 4), тоді холлівський опір відповідно становить $(R_X)_{n=2} = \frac{h}{2e^2} = 12906,4035 \text{ Ом}$, або $(R_X)_{n=4} = 6453,20175 \text{ Ом}$.

Еталон одиниці опору на КЕХ

Основним пристроєм еталона є установка (міра) для відтворення квантового ефекту Холла – «холлівська» міра опору.

Крім неї первинний еталон містить у собі:

- групу зберігання одиниці електричного опору,
- систему передавання, яка складається з кількох мостів-компараторів опору і *мір опору* для передачі розміру одиниці в діапазоні від 10^{-6} до 10^{12} Ом.

Типові метрологічні характеристики еталона опору на КЕХ такі:

- номінальні значення відтвореного опору 12906,4035 і 6453,20175 Ом;
- діапазон, у який передається розмір одиниці, від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{12}$ Ом;
- невизначеність відтворення $(1-5) \cdot 10^{-8}$;

Україна створила свій сучасний первинний еталон опору на КЕХ. Принцип передавання розміру одиниці від квантової міри Холла в широкий діапазон опорів показано на рис. 6, загальний вигляд – на рис. 7.

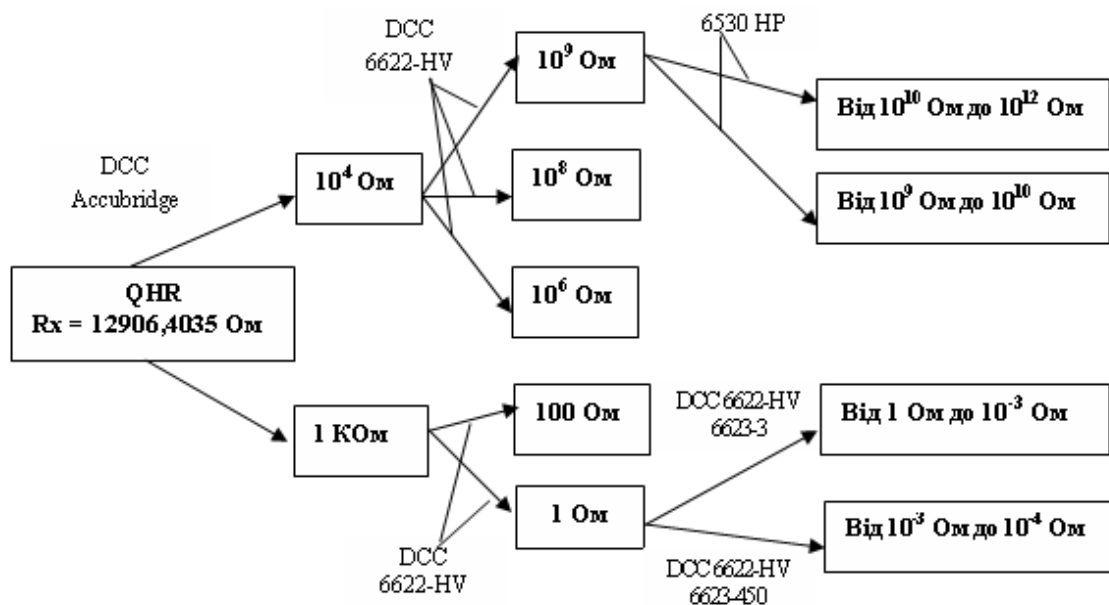


Рисунок 6 – Схема передавання розміру одиниці в діапазон опорів

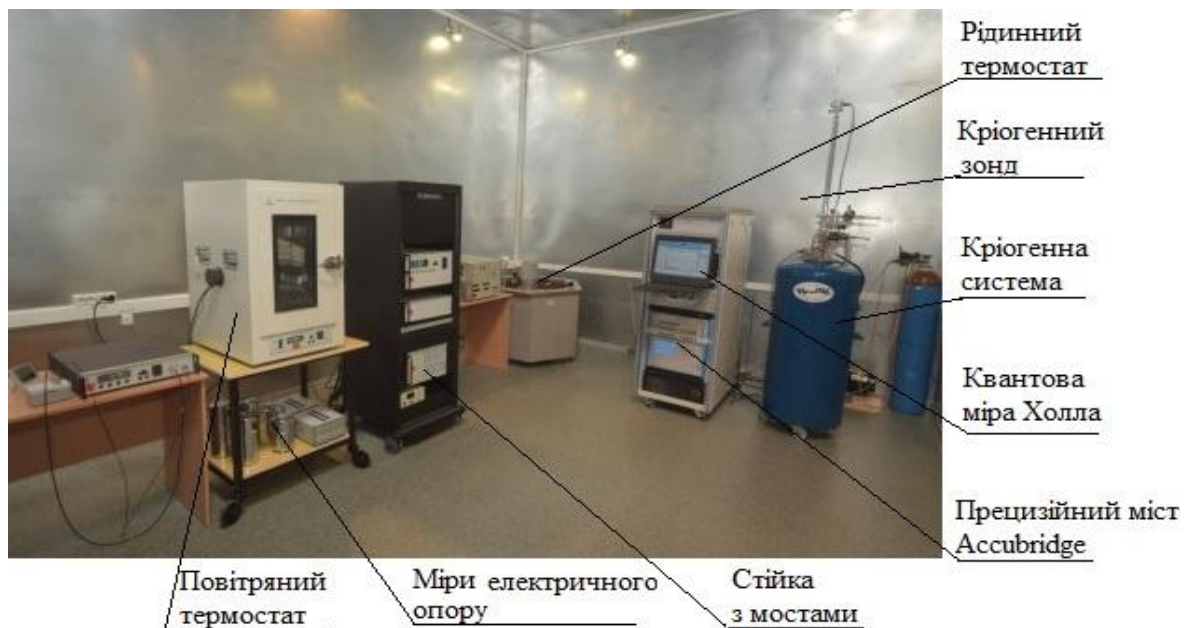


Рисунок 7 – Первинний еталон електричного опору України

Відтворення одиниць ємності і індуктивності за допомогою КЕХ

Фарад Φ і генрі Гн можуть бути реалізовані шляхом калібрування (звірення) опору невідомої ємності або індуктивності за допомогою імпедансу відомого опору, отриманого через квантовий ефект Холла, з використанням, наприклад, квадратурного моста або моста Віна

Спрощену схему відтворення (калібрування) одиниць ємності і індуктивності з використанням КЕХ подано на рис. 8.



Рисунок 8 – Схема реалізації фарада або генрі з використанням КЕХ

3.5. Відтворення «квантового» ампера

МеР дає такі рекомендації щодо реалізації ампера:

- а) за допомогою закону Ома, через вольт і ом $A = V/\Omega$, (опосередковано),
- б) методом одноелектронного тунелювання.

Метод закону Ома: $I = \frac{U_{\text{Дж}}}{R_X}$, де $U_{\text{Дж}}$, R_X – електричні напруга і опір,

визначені шляхом простежуваності до сталих Джозефсона, і Клітцинга $K_{\text{Дж}}$ і R_K відповідно.

$$U_{\text{Дж}} = n \frac{h}{2e} f_0 = nf K_{\text{Дж}}^{-1}$$

$$R_X = \frac{h}{me^2} = \frac{1}{m} R_K .$$

Тоді сила струму

$$I = nK_{\text{Дж}}^{-1} mR_K^{-1} f = \frac{1}{2} n m e f .$$

де n , m – цілі числа; f – частота опромінення в ефекті Джозефсона.

Таким чином, ампер відтворюється через частоту і елементарний заряд, що відповідає його визначенню в Новій SI.

У самому загальному вигляді установка для відтворення сили струму складається з джерела (міри) «джозефсонівської» напруги $U_{\text{Дж}}$, кріогенної міри «холлівського» опору R_K , кріогенного струмового компаратора і джерела струму (рис. 9).

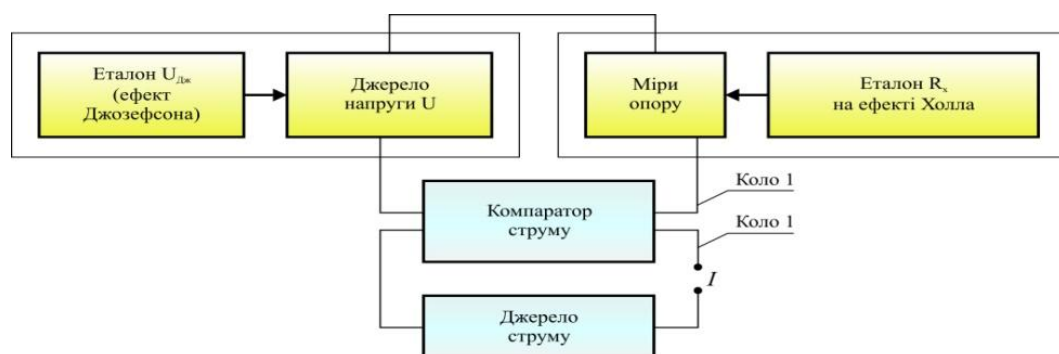


Рисунок 9 – Установка для відтворення сили струму

Орієнтовне значення стандартної невизначеності відтворення одиниці сили струму в кращих реалізаціях становить $(1-5) \cdot 10^{-8}$.

Відтворення на основі ефекту одноелектронного тунелювання.

Метод полягає у використанні квантового явища *тунелювання* електронів і визначення сили струму за формулою $I = ef_T$, де e -елементарний заряд, f_T - частота тунелювання.

Цей ефект одержав назву *одноелектронного тунелювання* (SET-Single Electron Tunneling) і викликав особливу увагу можливістю прямої реалізації «квантового ампера», а також вирішення проблеми так званого «квантового трикутника», яка полягає в *узгодженні розмірів вольт, ампера і ома, реалізованих через квантові ефекти, із законом Ома*

Але пряма реалізація ампера виявилась складним завданням. Роботи зі створення джерела струму на ефекті *одноелектронного тунелювання* ведуться вже близько двадцяти років у багатьох країнах, і в цьому напрямку досягнуті певні успіхи, але говорити про створення еталона передчасно.

Однак на рівні наукового експерименту узгодження квантових методів і закону Ома слід вважати доказаним з невизначеністю приблизно кілька одиниць на 10^{-8} .

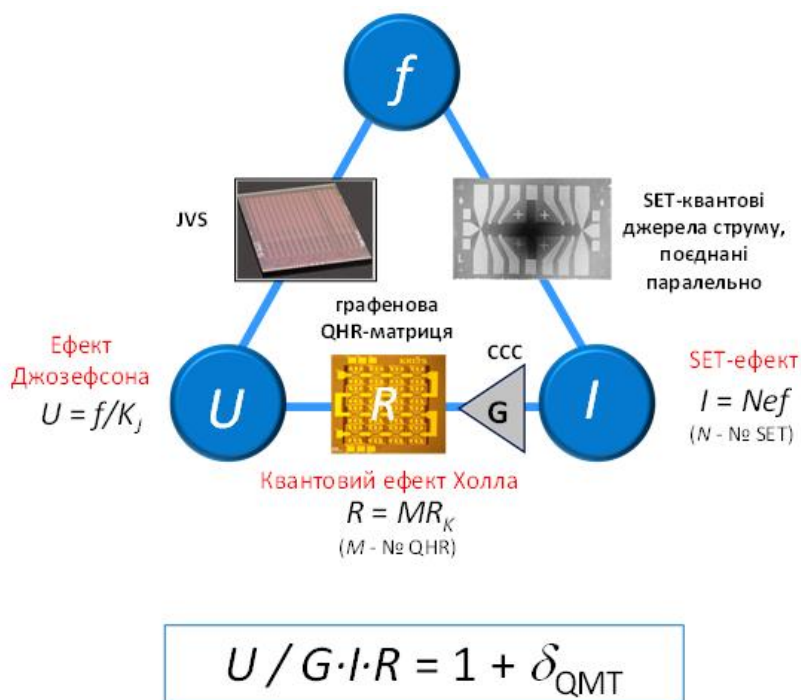


Рисунок 10 – Замикання «квантового трикутника»

3.6. Відтворення одиниць магнітних величин

Базовою магнітною величиною є *магнітна індукція або густина магнітного потоку*, одиницею якої є *тесла*. Інші магнітні одиниці знаходяться через теслу за відомими співвідношеннями.

МеР-2019 рекомендує два підходи (методи) відтворення одиниці магнітної індукції – тесли: *розрахунковий і квантовий*.

Розрахунковий метод є традиційним методом відтворення магнітних величин через розраховану магнітну сталу котушки і значення електричного струму. Магнітна індукція B визначається відповідно до виразу

$$B = K_B I + \Delta B$$

де K_B – стала струмової котушки, яка визначається за її геометричними розмірами; I – сила струму в обмотці; ΔB – залишок магнітного поля Землі.

Цей метод забезпечує достатньо високу точність для добре відомих конструкцій, таких як котушки Гельмгольца, Кемпбела, соленоїди тощо.

Метод ЯМР: макроскопічний квантовий ефект *ядерного магнітного резонансу* (ЯМР). було відкрито у 1946 р. Блохом і Парселем (Нобелівська премія), суть його полягає в наступному [2].

Ряд речовин володіють магнітними властивостями, вони називаються *магнетиками*.

Ядра атомів речовин – діамагнетиків – володіють магнітним моментом μ і моментом кількості руху p . Відношення цих моментів $\gamma = \mu/p$ носить назву *гіромагнітного відношення* і є фізичною сталою для даного ядра.

Якщо таку діамагнітну речовину в ампулі помістити в однорідне постійне магнітне поле з індукцією B , то магнітні моменти (диполі) будуть прецесувати навкруги напрямку вектора індукції. Частота прецесії f_{np} атомного ядра робочої речовини визначається магнітно-механічними властивостями ядра цієї речовини і значенням напруженості магнітного поля H , у якому воно знаходиться:

$$2\pi f = \mu_0 \gamma H,$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму; $\mu_0 H = B$ – магнітна індукція.

Якщо частота прецесії збігається з частотою зовнішнього електромагнітного поля, то має місце квантове явище ядерного магнітного резонансу, яке супроводжується резонансним поглинанням або випромінюванням енергії внаслідок переходу атома з одного енергетичного рівня на іншій.

Принцип відтворення тесли і побудови відповідного еталона пояснюється за допомогою структурної схеми, наведеної на рис. 11 .

Розчин з речовиною – діамагнетиком знаходиться в ампулі, на якій намотані ВЧ-катушки. Ампула поміщається в магнітне поле у робочому зазорі між полюсами електромагніта.

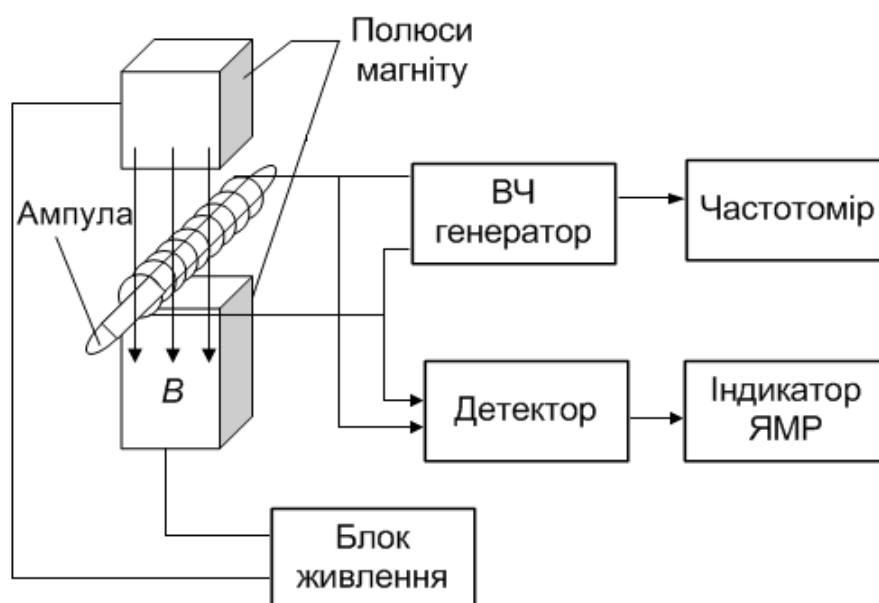


Рисунок 11 – Схема реалізації ефекту ЯМР

На катушку подається напруга від ВЧ-генератора, при збігу 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, а частота вимірюється.

У момент ЯМР справедлива формула $B = 2\pi f / \gamma_p$, на основі якої можуть вирішуватися різні вимірювальні задачі.

Найбільш часто в ЯМР-перетворювачах застосовуються резонанси ядер водню Н (протона), літія та дейтерія.

На практиці схема первинного еталона містить також цілий ряд додаткових пристроїв для стабілізації магнітного поля, струму живлення, частоти тощо. За цією схемою побудовано *первинний еталон України*, який має такі основні характеристики:

діапазон значень B від 0,05 до 2 Тл;

стандартна невизначеність $(1-3) \cdot 10^{-6}$.

Подальший розвиток квантової магнітометрії

Відкриття ефекту ЯМР поклало початок розвитку *квантової магнітометрії*, а також появи інших видів *квантових магнітних перетворювачів*, крім ядерного, розглянутого вище.

Квантові перетворювачі поділяються на *ядерні, електронні та атомні* (рис. 12).

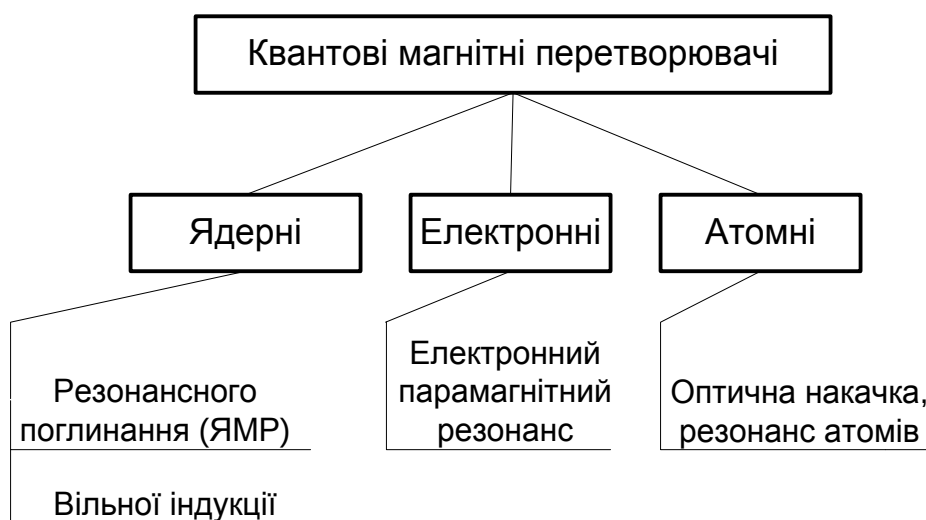


Рисунок 12 – Класифікація магнітних перетворювачів

Найбільше використання знайшли *атомні магнітні перетворювачі*, для підсилення резонансного сигналу проводиться орієнтація магнітних моментів ядер за допомогою допоміжного постійного магнітного поля або оптичної накачки. В атомних перетворювачах використовується резонанс атомів рубідія, цезія, гелія. Застосовуються для вимірювання слабких магнітних полів (менше 10^{-4} Тл). Орієнтовні характеристики методів наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Метод	Діапазон вимірювань, Тл	Орієнтовна невизначеність
Ядерного магнітного резонансу	Середні і сильні поля 0,01–10 Тл	$10^{-6} - 10^{-5}$
Вільної ядерної індукції	Слабкі магнітні поля $10^{-6} - 10^{-4}$ Тл	10^{-2}
Електронного парамагнітного резонансу	слабкі магнітні поля $10^{-7} - 10^{-3}$ Тл	10^{-2}
Резонансу атомів	слабкі магнітні поля $10^{-8} - 10^{-4}$ Тл	$10^{-5} - 10^{-4}$

РОЗДІЛ 4

Кілограм: від артефакту до «квантового». Моль

4.1. Коротка історія

Маса є основною величиною SI від механіки. Одиницею маси є кілограм.

При введенні метричної системи кілограм був визначений як *маса 1 дм³ дистильованої води за температури її максимальної густини (+4°C)*. На 3-й CGPM (1901 р.) було прийнято ухвалу, згідно з якою *кілограм став дорівнювати масі міжнародного прототипу кілограма (ІРК)– платино-іридієвої гирі і втратив зв'язок із метром*.

Багато років провідні метрологічні інститути світу вели пошук методів відтворення природного кілограма. На сьогодні, згідно рішення 26-ї ГКМВ, у SI-2019 обрано метод визначення кілограма через **сталу Планка**:

Кілограм, символ kg, є одиницею вимірювання маси в системі SI, що встановлюється фіксуванням чисельного значення сталої Планка, $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Реалізація цього визначення може бути проведена шляхом порівняння механічної потужності (куди входить маса), з електричною, параметри якої (напруга і струм) можуть бути виміряні за допомогою квантових ефектів. Цей метод одержав назву методу «*ват-ваг*» або «*електричного кілограма*».

4.2. Відтворення кілограма через сталу Планка

Для реалізації цього методу, суть якого полягає в порівнянні механічної і електричної потужностей, була розроблена і сконструйована унікальна установка, яка одержала назву *ват-вагів*.

Суть методу і принцип роботи ват-вагів полягають в наступному (рис. 13).

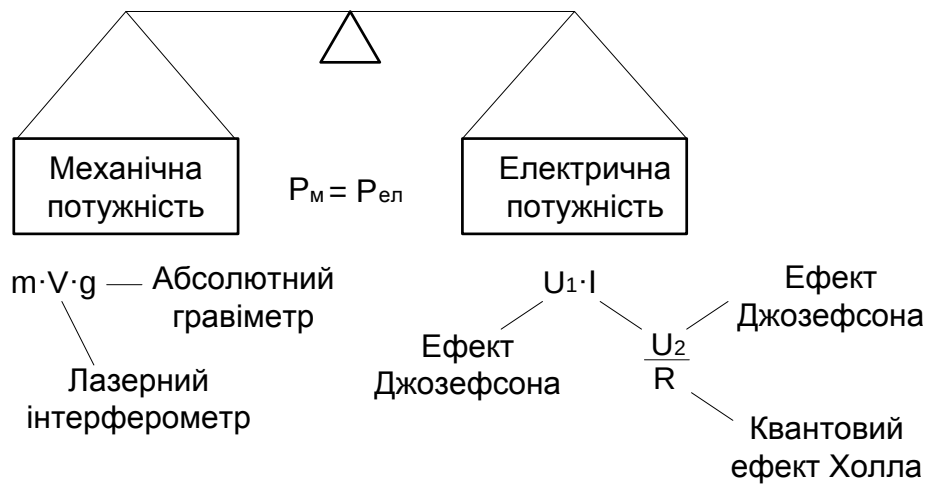


Рисунок 13 – Принцип роботи ват-ваг

У ході двохетапного експерименту порівнюються механічна і електричні потужності (віртуальні), а також вимірюються величини, що входять до рівняння вимірювань: швидкість V руху рамки зі струмом (за допомогою лазерного інтерферометра), прискорення вільного падіння g (за допомогою абсолютного гравіметра), електрична напруга U (ефект Джоуля) і електричний опір R (квантовий ефект Холла). Тоді вираз для m набуває вигляду

$$m = h \frac{f_1 f_2}{vg} C_{el},$$

де f_1 і f_2 – частоти опромінення у двох експериментах Джоуля, C – стала ват-ваг.

У ват-вагах, що діють у національних метрологічних інститутах США і Великої Британії, наразі заявлена невизначеність відтворення «електричного» кілограма кілька одиниць на 10^{-8} .

Оскільки у цьому методі кілограм відтворюється через вимірювання електричних величин, він одержав назву «електричного кілограма».

4.3. Відтворення кілограма через сталу Авогадро

Другим методом, який конкурував з методом сталої Планка, став метод *сталой Авогадро або «атомного кілограма»*.

У основі метода «атомного» кілограма лежить визначення числа Авогадро N_A як кількості атомів, яка міститься в 0,012 кг ізотопу вуглецю – ^{12}C .

Якщо 0,012 кг містить N_A атомів, то в 1 кг повинно міститись X атомів ^{12}C , яке дорівнює

$$X = \frac{N_A}{0,012} = \frac{1000 N_A}{12} = \frac{1000 \cdot 6,0221415 \cdot 10^{23}}{12} = 5,01845166 \cdot 10^{25}.$$

Кількість атомів може бути визначена так званим *XRCD-методом*. Концепція XRCD–методу (рентгенівської густини кристала) походить від класичної ідеї, що маса чистої речовини може бути виражена через кількість структурних одиниць в речовині. Така кількість може бути виміряна методом, в якому об'єм елементарної комірки і майже ідеального кристала визначається шляхом вимірювання параметра ґратки a та середнього діаметра сферичного зразка. Найчастіше в цьому методі використовуються *монокристали кремнію*, оскільки з нього можна отримати крупні кристали, що мають високу хімічну чистоту і в яких відсутні дислокації. Стандартна невизначеність складає орієнтовно $(3\text{--}5) \cdot 10^{-8}$. Метод має своє значення для метрології, як другий незалежний метод.

4.4. Моль: зміни не вплинуть на практику

Нове визначення моля не потребує ніяких змін у сучасній метрологічній практиці. Одним із найбільш важливих наслідків перевизначення моля є те, що *стала Авогадро і низка інших пов'язаних із нею сталих набувають точних значень*.

РОЗДІЛ 5

Кельвін

5.1 Коротка історія

Одиниця температури пройшла свою історію. У 1954 р. (з уточненнями 1960 і 1967 рр.) CGPM прийняла рішення щодо визначення термодинамічної температурної шкали через *потрійну точку води* як фундаментальну реперну точку, *температура якої дорівнює точно 273,16 кельвіна. Але оскільки температуру потрібно знати в широкому діапазоні, треба відтворювати температурну шкалу у цьому діапазоні.*

Розрізняють *термодинамічну і практичну* температурні шкали. *Термодинамічна шкала* – це шкала, яка базується на законах термодинаміки та властивостях ідеальної теплової машини, яка функціонує за циклом Карно. Відтворення термодинамічної *шкали* пов'язане зі значними труднощами

Практична температурна шкала – шкала, яка замінює термодинамічну і містить ряд добре відтворюваних опорних точок, термодинамічна температура яких ретельно виміряна і зафіксована за допомогою первинних термометрів.

У 1927 р. була встановлена перша *практична* температурна шкала, яка відтворювалась за певними *реперними точками*. Як реперні (опорні) обирали точки, які відповідали температурам переходу термометричної речовини з одного агрегатного стану в інший (температури потрійних точок, плавлення, тверднення, кипіння). У цих точках температура речовини залишається постійною увесь час, поки здійснюється перехід. Практична шкала час від часу уточнюється. Після практичної шкали 1927 р. були шкали 1948 р, 1968. і 1990 років – *МТШ-90*. У 2000 р. вона була доповнена тимчасовою низькотемпературною шкалою ТНТШ-2000. Шкала МТШ-90 діє і в цей час, (див. табл. 3)

Таблиця 3 – Основні реперні точки МТШ-90

Стан фазової рівноваги	Речовина	Значення за МТШ-90	
		$^{\circ}\text{C}$	K
Тиск насичених парів гелію	^3He	-272,50	0,65
	^4He	-268,15	5
Потрійна точка водню	H	-259,346	13,803
Потрійна точка неону	Ne	-248,593	24,556
Потрійна точка кисню	O	-218,791	54,358
Потрійна точка аргону	Ar	-189,344	83,805
Потрійна точка ртуті	Hg	-38,834	234,315
Потрійна точка води	H₂O	+0,01	273,16
Точка плавлення галію	Ga	+29,764	302,914
Точка плавлення індію	In	+156,598	429,748
Точка плавлення скандію	Sc	+231,928	505,078
Точка плавлення цинку	Zn	+419,527	692,677
Точка плавлення алюмінію	Al	+660,323	933,473
Точка плавлення срібла	Ag	+961,78	1234,93
Точка плавлення золота	Au	+1064,18	1337,33
Точка плавлення міді	Cu	+1084,62	1357,77

У діапазоні температур від 0,65 K до 1357 K для відтворення реперних точок МТШ-90 використовуються методи *контактної термометрії*, на більш високих температурах – методи *оптичної термометрії*.

CIPM, маючи довгострокову мету визначення всіх основних одиниць SI через ФФС, щоб забезпечити тривалу стабільність одиниць, прийняла рішення про визначення з 2019 р. кельвіна через **сталу Больцмана k** .

5.2 Первинна термометрія

Як показано в ряді робіт, перевизначення *кельвіна* веде до необхідності використання методів *первинної термометрії* для його відтворення. MeP називає методи, за допомогою яких, знаючи сталу Больцмана, можна визначати температуру T . Це *акустична газова термометрія (AGT)*, *газова термометрія за діелектричною проникністю (DCGT)*, *газова термометрія за показником заломлення (RIGT)*, *шумова термометрія* (термометрія шуму Джонсона – JNT), *термометрія за доплерівським розширенням спектральних ліній (DBT)* та деякі інші (рис. 14). На сьогодні найкращі результати одержано за допомогою

методів акустичної газової термометрії та газової термометрії за діелектричною проникністю.

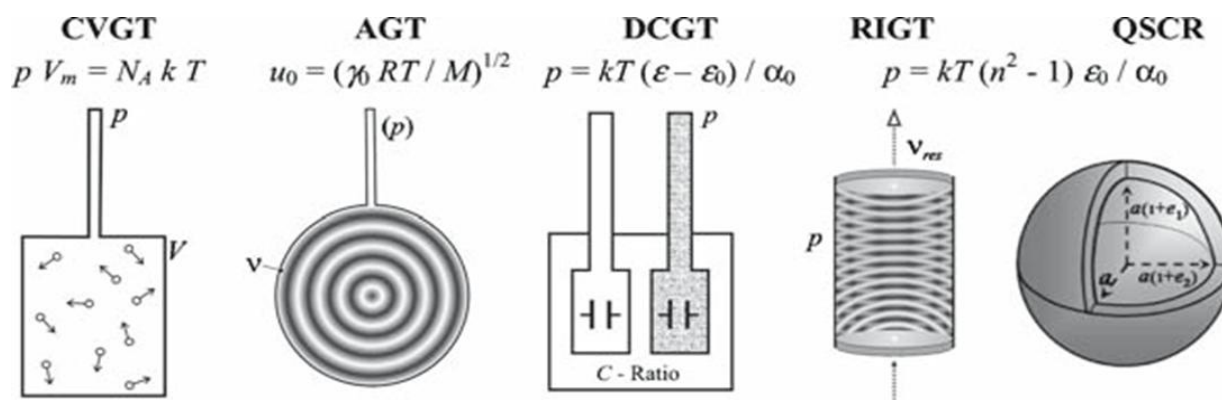


Рисунок 14 – Методи і засоби первинної термометрії

Як прогнозується, зміна визначення кельвіна *не приведе до суттєвих змін* у практичній метрологічній діяльності: МТШ-90 ще довго зберігатиме своє значення, проте більше *не буде єдиною практичною основою* для температурних вимірювань.

У більшості країн світу еталонна база в галузі температурних вимірювань побудована за принципом реалізації реперних точок МТШ-90. До прийняття СІ-2019 ці еталони мали статус первинних. Нове визначення буде стимулювати подальше удосконалення первинних термометрів, і поступово вони замінять еталони МТШ-90.

5.3. Еталони України

В Україні створено комплекс із чотирьох первинних еталонів температури; два на основі *контактної термометрії* (від 13,880 до 273,16 К; від 273,16 до 1357,77 К), і ще два (від 1357,77 до 2800 К; і від 292,67 до 1234,93 К) на вимірюванні температури за *випромінюванням*. За метрологічними характеристиками вони знаходяться на сучасному рівні.

РОЗДІЛ 6

Кандела

6.1 Коротка історія

Історія величин і одиниць для оптичних вимірювань починається з XIX століття, коли полум'я свічки (the candle) було використано як одиницю сили світла, яку і було названо "свічкою".

Сила світла всіх «полум'яних» еталонів у значній мірі залежала від чистоти палива, частки вуглекислоти в ньому і ряду інших факторів.

Більш перспективними виявились еталони, випромінюючим елементом яких було розжарене до високої температури тверде тіло. Але і ці еталони виявились недосконалими. У 1924 р. Міжнародна комісія з освітленості винесла рішення про прийняття **“чорного тіла”** як основного світлового еталона (еталона яскравості) і вказала на необхідність розробки методики відтворення його яскравості. При визначеній температурі воно має постійну і відому спектральну характеристику розподілу енергії у відповідності до закону Планка.

Такий еталон було створено в NBS (США) у 1930 р. і з цього часу цей метод став загальновизнаним. В 1948 р. було прийнято нову назву для одиниці сили світла – **кандела**. Її визначення пройшло свою еволюцію, і в 1979 р. було прийнято таке визначення кандели:

“Кандела дорівнює силі світла у заданому напрямку джерела, яке випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку становить $1/683$ Вт/ср”.

Це визначення вводить деяку метрологічну сталу - максимальну світлову ефективність $k_m = 683$ лм/Вт, яка пов'язує світлові і енергетичні величини на довжині хвилі $\lambda_m = 555$ нм (частота $540 \cdot 10^{12}$ Гц), що відповідає максимальній чутливості людського ока.

Визначення кандели 1979 р. дало можливість її реалізації не тільки за допомогою *еталонного джерела* (випромінювача), яким є абсолютно чорне

тіло, але і за допомогою *еталонного детектора* (приймача), Як приймач використовувався прецизійний *радіометр* (вимірювач потужності оптичного випромінювання) з електричним заміщенням.

Пізніше з'явився ще один метод – *рахування числа фотонів*, але поки як перспектива.

Як показано в розділі 1, нове визначення кандели в SI-2019 не змінило суті цієї одиниці, тобто і методології її відтворення.

6.2. Реалізація кандели на основі джерела випромінювання

На практиці використовується, як правило, випромінювач Планка (*чорне тіло*) - резонатор з високим коефіцієнтом випромінювання (дуже близьким до одиниці). Для багатьох високоточних застосувань термодинамічну температуру в порожнині встановлюють за допомогою відкаліброваного детектора з фільтром (“фільтрового радіометра”), маємо простежуваність до електричних одиниць.

6.3. Реалізація кандели на основі приймача

Еталон-приймач може бути реалізовано у трьох варіантах:

1)Приймач-радіометр

Як приймач використовувався прецизійний *радіометр* (вимірювач потужності оптичного випромінювання) з електричним заміщенням. З існуючих радіометрів такого типу найбільш високу точність мають *кріогенні радіометри* (невизначеність близько $1 \cdot 10^{-4}$, мінімальна досягнута 10^{-5}).

2)Приймач на основі фотодетектора

Другим різновидом приймачів оптичного діапазону є *фотоприймачі* (*фотометри*). Ці приймачі побудовані на *фотодетекторах*, що використовують квантове фізичне явище – *фотоефект*, яке полягає в іонізації атомів і молекул газу під дією світла.

3)Приймач на основі трап-детектора

Трап-детектор (детектор-пастка) – специфічний фотодетектор, побудований таким чином, щоб поглинути максимум енергії світла і перетворити її в електричну енергію. Він складається з кількох діодів, встановлених послідовно на шляху світла під різними кутами таким чином, щоб після багаторазового відбиття світло не вийшло з пастки. Важливою метрологічною характеристикою фотоприймача є *квантова ефективність* – відношення числа фотонів, поглинання яких викликало утворення квазічастинок (електронів), до загального числа поглинутих фотонів. У *трап –детекторів* квантова ефективність є близькою до 100%,завдяки чому вони одержали назву *абсолютних приймачів*.

На цьому методі побудовано **первинний еталон України**. Крім одиниці сили світла (кандели), еталон відтворює також одиниці *освітленості (люкс)* і *освітлення (кандела на секунду)* і має наступні метрологічні характеристики:

- діапазон відтворення сили світла 1 – 500 кд;
- діапазон відтворення освітленості 0,1 – 1000 лк;
- діапазон відтворення освітлення 10^{-3} – 500 кд·с;
- стандартні невизначеності відтворення одиниць не перевищують $1 \cdot 10^{-3}$:

Ці значення відповідають сучасному рівню.

6.4. Перспективи метода, що ґрунтується на рахуванні числа фотонів

Сучасні квантові технології і практичні досягнення в управлінні і рахуванні окремих фотонів (*однофотонне тунелювання*) обіцяють нові досягнення в прецизійній і практичній фотометрії,. Це стимулює перевизначення фотометричних величин через кількість фотонів, І хоч про практичні результати говорити рано, ця задача фігурує серед перспективних в міжнародних програмах з метрології.

ПІДСУМКИ

Фундаментальні переваги Нової SI:

*20 травня 2019р., у Всесвітній день метрології, набули чинності суттєві зміни до Міжнародної системи одиниць SI, прийняті 26 CGPM у листопаді 2018 р., а сама оновлена система одержала умовну назву Нової SI. У зв'язку з цією подією директор BIPM Мартін Мілтон і директор BIML Ентоні Доннелан виступили з Посланням, в якому вони дали коротку характеристику цим змінам, а саму Нову SI назвали «**фундаментально кращою**». У Посланні підкреслено такі особливості SI:*

- усунення визначень одиниць на основі артефактів;*
- використання законів природи для встановлення законів вимірювання;*
- рівень точності обмежується лише нашою здатністю реалізувати ці закони.*

Розглянемо таку оцінку

1) Дійсно, фундаментальною перевагою SI-2019 є відсутність визначень одиниць на основі артефактів, тобто **Нова SI є повністю природною системою**: визначення одиниць відбувається через фундаментальні сталі – **еталони природи**, реалізація – через квантові ефекти-закони природи.

2) Виконано всі вимоги до реформи системи SI, сформульовані CGPM, щодо **незмінності** розмірів одиниць, **точності** їх відтворення, **переваг** для метрології і науки в цілому; **узгодженості**.

3) Нова SI передбачає **простежуваність не до первинних еталонів, а до сталих**, що відкриває можливість впроваджувати нові принципи забезпечення єдності вимірювань, зокрема, **децентралізацію**.

4) У Новій SI збережені всі позитивні риси SI: **універсальність, уніфікованість, когерентність, узгодженість, зручність**.

5) Нова SI сприяє впровадженню і стимулює подальший розвиток квантових методів і технологій у *практичній метрології*. Саме завдяки цьому на сьогодні досягнуто такі практичні результати:

- в просторово-часових вимірюваннях: створення КСЧ оптичного діапазону; створення фемтосекундних лазерів;
- в електричних вимірюваннях: реалізація ефекту Джозефсона (ЕД) на змінному струмі; ЕД на явищі ВТНП, ЕД на безгелієвих (механічних) охолоджувачах; КЕХ на змінному струмі, замикання «квантового трикутника», розвиток квантової магнітометрії;
- у вимірюваннях маси: реальні успіхи у реалізації природного кілограма, а також у відтворенні малих мас з високою точністю (настільні ват-ваги);
- у температурних вимірюваннях: розвиток первинної термометрії;
- у оптичних вимірюваннях: використання фотоефекта і детекторів з високою квантовою ефективністю (трап-детекторів);
- у квантових технологіях: прогрес у одноелектронному і одnofотонному тунелюванні, впровадження нових наноматеріалів (графена тощо).

У таблиці 4 наведено первинні методи відтворення основних одиниць у SI-19.

Таблиця 4 – Відтворення основних одиниць

Основні величини, одиниця	Первинний метод	Рівняння випробувань	min невизначеність
Час, с	Квантовий перехід в цезії–133 (Cs_{133})	$c = 919261770 T_{\text{Cs}}$	10^{-16}
Довжина, м	Генерування когерентного світлового випромінювання і вимірювання його частоти f	$L = \frac{c_0}{f}$	$(1-2) \cdot 10^{-11}$
Маса, кг	Врівноваження $P_{\text{мех}}=P_{\text{ел}}$ Вимірювання $P_{\text{ел}}$ через квантові ефекти	$m = h \frac{f_{j1} \cdot f_{j2}}{V \cdot g}$	$(1-3) \cdot 10^{-8}$
Електричний струм, А	1. Закон Ома 2. SET-тунелювання	$I = \frac{U_j}{R_x} = n m e f_j$ $I = e f_T$	10^{-8} 10^{-8}
Температура, К	Первинна термометрія	$Q = k \Theta$ енергія стала Б температура	$<10^{-6}$
Сила світла, Кд	1. Випромінювання АЧТ 2. Криогенний радіометр 3. Приймач зі 100% квантовою ефективністю		10^{-3}
Кількість речовини, моль	Еталон не створюється	N_A стала Авогадро	

ДЕРЖАВНІ ЕТАЛОНИ УКРАЇНИ

1 Еталонна база України. Коротка історія

Після розпаду СРСР у 1991 р. в Україні залишилось лише 10 державних еталонів зі 150, що існували в СРСР. Ці еталони не задовольняли потреб економіки країни і серед них не було жодного еталона основних одиниць SI.

Вже через рік це далось взнаки, і створений у 1992 р. центральний орган виконавчої влади в галузі метрології (ЦОВМ) – Держстандарт України – ініціював розробку Програми створення еталонної бази. У цьому ж році силами ННЦ «Інститут метрології» (тоді – ХДНДІМ), Укрметртестстандарту (тоді – Український центр стандартизації і метрології) і НДІ «Система» така Програма була розроблена і затверджена.

Перша черга цієї Програми на 1993–1997 рр. включала розробку найважливіших державних еталонів, у тому числі еталонів основних одиниць. У 2006 р. Постановою Кабінету Міністрів України № 228 було затверджено «Державну програму розвитку еталонної бази на 2006–2010 рр.», яку потім було трансформовано Постановою КМУ від 23 липня 2008 р. № 676 у «Державну програму розвитку еталонної бази на 2009–2010 рр.». Після виконання заходів цієї програми КМУ 22 грудня 2010 р. приймає Постанову № 1165 «Про затвердження Державної програми розвитку еталонної бази на 2011–2015 рр.», в межах якої зараз відбувається розвиток і модернізація еталонної бази України.

Завдяки реалізації програм сьогодні в Україні створено 80 державних первинних еталона та 69 вторинних еталона, кількість яких за видами вимірювань наведено на рис. 15.

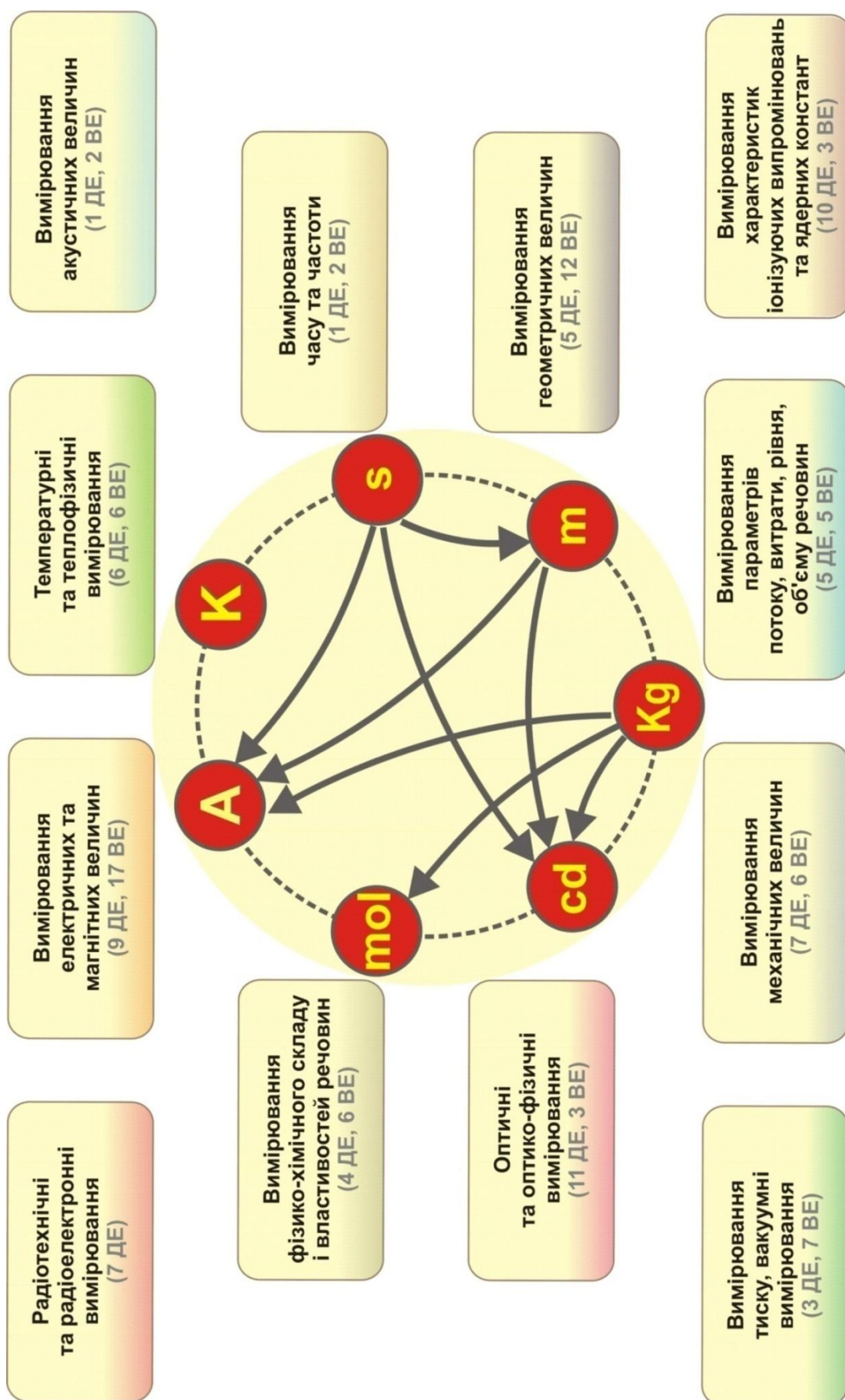


Рисунок 15 – Розподіл еталонів України за видами вимірювань

2. Електричні, радіотехнічні та магнітні вимірювання

Ще під час розробки програми створення еталонної бази України 1993–1997 рр. було враховано рекомендацію СІРМ щодо створення первинних еталонів вольт та ома на основі квантових ефектів. Таким чином в Україні сьогодні існує сучасний первинний еталон вольт на ефекті Джозефсона, квантовий еталон одиниці магнітної індукції на ефекті ЯМР, а також еталон одиниці електричного опору на квантовому ефекті Холла. Створені й експлуатуються також державні первинні еталони: електричної ємності, індуктивності, електричної напруги змінного струму, високої електричної напруги змінного та постійного струму кута фазового зсуву, електричної потужності НЧ і НВЧ (3 еталони), параметрів модуляції і спотворення радіосигналів (3 еталони). На рис. 16 позначено такі еталони:

- 1 - ДПЕ одиниці електрорушійної сили на ефекті Джозефсона;
- 2 - ДЕ одиниці електричної напруги від 0,1 до 1000 В змінного струму у діапазоні частот від 10 Гц до 1 МГц;
- 3 - ДПЕ одиниці електричної напруги змінного струму в діапазоні частот від 30 до 1000 МГц;
- 4 - ДЕ одиниці електричної напруги постійного струму у діапазоні від 1 до 180 кВ;
- 5 - ДЕ Державний еталон одиниці електричної напруги змінного струму в діапазоні від 1 до 1,2 кВт і коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги на частоті 50 Гц;
- 6 - ДПЕ одиниці електричного опору на квантовому ефекті Холла;
- 7 - ДЕ одиниць електричної ємності і фактора втрат;
- 8 - ДПЕ одиниць індуктивності та тангенса кута втрат;
- 9 - ДПЕ одиниці кута зсуву фаз між двома напругами;
- 10 - ДПЕ сили постійного струму;
- 11 - ДПЕ сили змінного струму;
- 12 - ДПЕ одиниці магнітної індукції в діапазоні від 0,05 до 2 Тл;
- 13 - ДЕ одиниць електричної потужності і коефіцієнта потужності;

14 - ДПЕ одиниці потужності електромагнітних коливань у хвильоводних трактах у діапазоні частот від 37,5 до 178,6 ГГц / ДПЕ одиниці потужності е/м коливань у діапазоні від 0,03 ГГц до 18 ГГц;

15 - ДПЕ одиниці коефіцієнта гармонік;

16 - ДПЕ одиниці коефіцієнта амплітудної модуляції;

17 - ДПЕ одиниці девіації частоти частотно-модульованих коливань;

18 – ДЕ одиниці напруженості е/м поля (на рис не показано).

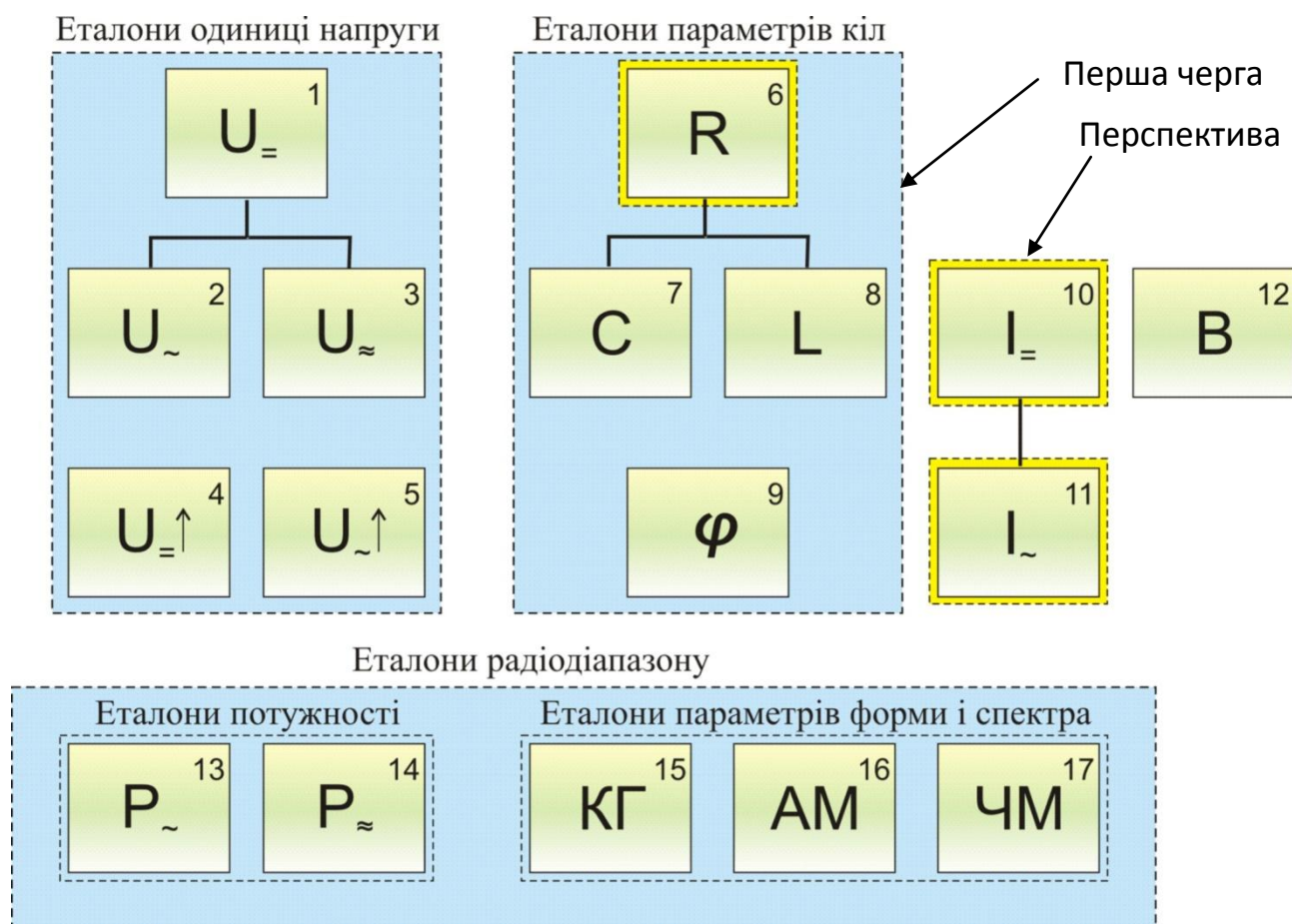


Рисунок 16 – Система еталонів у галузі електричних вимірювань

3. Температурні і теплофізичні вимірювання

Комплекс первинних еталонів одиниці температури, створений в Україні (від 13,880 до 273,16 К; від 273,16 до 1357,77 К) повністю відповідає вимогам

реалізації МТШ-90. Ще два ДПЕ (від 1357,77 до 2800 К; від 292,67 до 1234,93 К) ґрунтуються на вимірюванні температури за випромінюванням.

Крім цих чотирьох еталонів одиниці температури в Україні створено також первинний еталон одиниці енергії згоряння (Джоуля) та питомої теплоємності твердих тіл (Дж/кг·К), важливість яких визначається тією роллю, яку відіграє паливо й енергетика в життєдіяльності суспільства. На рис. 17:

- 1- ДПЕ одиниці температури Кельвіна у діапазоні від 273,16 до 1357,77;
- 2 - ДПЕ одиниці температури у діапазоні від 13,80 до 273,16 К;
- 3 - ДПЕ одиниці температури за випромінюванням у діапазоні від 1357,7 до 2800 К;
- 4 - ДПЕ одиниці температури за ІЧ-випромінюванням у діапазоні від 692,67 до 1234,93 К;
- 5 - ДПЕ одиниці енергії згоряння;
- 6 - ДПЕ одиниці питомої теплоємності твердих тіл у діапазоні температур від 1800 до 3000 К.

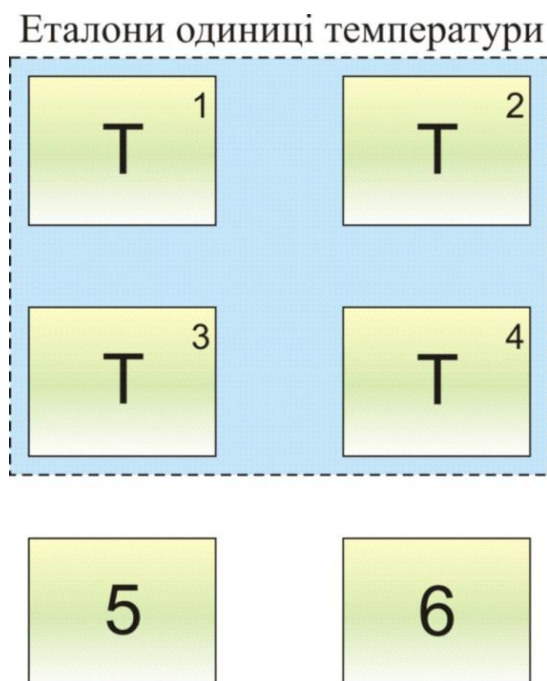


Рисунок 17 – Система еталонів у галузі температурних і теплофізичних вимірювань

4. Вимірювання маси та пов'язаних з нею величин

Існуючий ДПЕ одиниці маси України є достатньо укомплектованим і обладнаним еталоном, але має суттєвий недолік: до його складу входять не платино-іридієві гирі, а гирі з неіржавкої сталі, тобто менш стабільні. Але, як відомо, еталони кілограма, що існують у вигляді артефактів, займуть своє місце в системі забезпечення єдності та передавання розміру кілограма в метрологічну практику.

5. Вимірювання параметрів простору і часу

Ця галузь вимірювань включає частотно-часові та лінійно-кутові (геометричні) вимірювання. В Україні створено 5 первинних еталонів у цій галузі, з них два еталони основних одиниць: секунди і метра. Обидва ці еталони відтворюють названі одиниці відповідно до існуючих визначень: через частоту надтонкого переходу в цезії-133 і швидкість світла.

Інші еталони в цій галузі пов'язані з названими еталонами, тобто забезпечується простежуваність до сталих ν_{Cs} і c . Це державний первинний еталон (ДПЕ) одиниці довжини для параметрів евольвентних поверхонь і кута нахилу зуба, ДПЕ одиниці довжини для відхилень від прямолінійності та площинності і ДПЕ одиниці довжини для вимірювань параметрів шорсткості в діапазоні від 0,025 до 1600 мкм.

Разом з державними еталонами довжини і часу розроблені інші державні еталони таких галузях, як вимірювання параметрів шорсткості, прямолінійності та площинної; параметрів евольвентних поверхонь і кута нахилу лінії зуба зубчатих коліс.

Розробка вказаних еталонів була потрібна у зв'язку з необхідністю забезпечення єдності вимірювань великого парку специфічних засобів вимірювань.

Разом із парком вторинних еталонів державні еталони становлять еталонний комплекс України, що забезпечує єдність вимірювань параметрів простору і часу. Склад комплексу еталонів показано на рис. 18:

- 1 - ДПЕ одиниці довжини;
- 2 - ДПЕ одиниці довжини для параметрів евольвентних поверхонь та кута нахилу лінії зуба;
- 3 - ДПЕ одиниці довжини для відхилень від прямолінійності та площинності;
- 4 - ДПЕ одиниці довжини для вимірювань параметрів шорсткості $R_{\max}$, R_z і R_a у діапазоні від 0,025 мкм до 1600 мкм;
- 5 - ДПЕ одиниці площинного кута;
- 6 - ДПЕ часу і частоти.

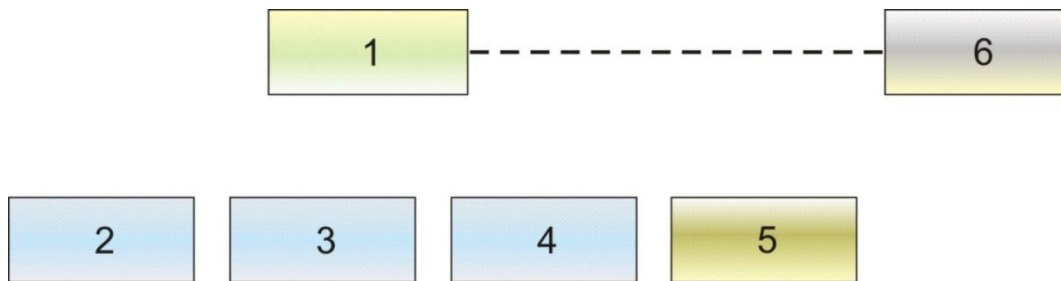


Рисунок 18 – Еталони України в галузі просторово-часових вимірювань

Як правило, державні еталони одиниці довжини в інших галузях вимірювань є високоточними інтерферометричними установками, що використовують лазери як джерело випромінювання. Зв'язок інших державних еталонів з вихідним державним еталоном – державним еталоном одиниці довжини 1 метр – здійснюється за допомогою прив'язки лазерів до еталонних джерел випромінювань.

6. Оптичні і оптико-фізичні вимірювання,

В області оптичних і оптико-фізичних вимірювань в Україні існує ДПЕ одиниці сили світла – кандели, який повністю відповідає уточненому визначенню кандели, а також ДПЕ одиниці світлового потоку – люмена.

Усього створено 10 ДПЕ в цій галузі, з них 8 – параметрів некогерентного випромінювання і 3 – енергетичних параметрів лазерного випромінювання, які не потребують змін (рис. 19):

- 1 - ДПЕ одиниці сили світла (кандели);
- 2 - ДПЕ одиниці світлового потоку (люмена);
- 3 - ДПЕ одиниці енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням;
- 4 - ДПЕ одиниць середньої потужності в імпульсі випромінювання, потужності неперервного випромінювання у світловоді та часу розповсюдження випромінювання у світловоді;
- 5 - ДПЕ одиниці оптичної густини матеріалів;
- 6 - ДПЕ одиниць спектральних параметрів випромінювання;
- 7 - ДПЕ одиниць координат кольору та координат кольоровості;
- 8 - ДПЕ одиниць спектральних коефіцієнтів спрямованого пропускання, дзеркального та дифузного відбиття

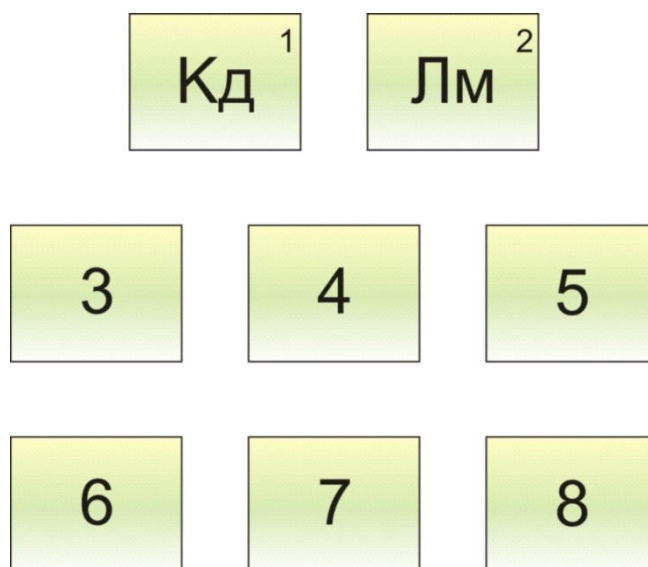


Рисунок 19 – Система еталонів в галузі некогерентної оптики

Список літератури

- 1 Миллс Я. М. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля : предлагаемый 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.
- 2 Purcell, Torrey, Paund // Phys. Rev. Mod. Phys. – 1946. – V. 18. – P. 323.
- 3 Josephson B. // Phys. Lett. – 1962. – V. 1. – P. 251.
- 4 Klitzing K. New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance / K. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V. 45. – № 6. – P. 494 – 497.
- 5 Резолюція 26 ГКМВ, 2018.
- 6 Гебль Е. Квантовая метрология (англ.), Брауншвейг, 2014.
- 7 Забезпечення єдності електрорадіовимірювань: підручник; за ред. проф. Ю. Ф. Павленка. – Х. : Вид-во „Підручник НТУ ХПІ”.-2014 – 235 с.
- 8 Вступ до квантової метрології. Підручник за ред. Ю.Ф.Павленка. - Харків, 2017.