

Ю.Ф. Павленко, І.П. Захаров

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

Навчальний посібник

Частина 1

Харків
ТОВ «Оберіг»
2023

Рецензенти:

Склярів В. В., д-р. техн. наук, с.н.с (ННЦ “Інститут метрології”);
Полярус О. В., д-р. техн. наук, професор (ХНАДУ)

*Рекомендовано до друку Вченою Радою
Харківського національного університету радіоелектроніки
(рішення №14/2 від 26.12.2023 року).*

Павленко Ю.Ф.

Забезпечення єдності вимірювань: навчальний посібник. Частина 1 /
Ю.Ф. Павленко, І. П. Захаров. – Харків: ТОВ «Оберіг», 2023. – 172 с.

ISBN 978-966-8689-69-7

В першій частині посібника розглядаються основні складові системи забезпечення єдності вимірювань: структура та елементи нової – квантової системи SI, особливості побудови первинних еталонів основних одиниць SI, забезпечення простежуваності результатів вимірювання шляхом калібрування. Аналізуються перспективи подальшого вдосконалення системи забезпечення єдності вимірювань: розвитку квантової метрології, перевизначення деяких одиниць у напрямку простежуваності до фундаментальних фізичних сталих, оцінюванню невизначеності вимірювань під час калібрувань. Призначено для студентів і викладачів ВНЗ, а також фахівців у галузі метрології і вимірювальної техніки.

УДК 006.91.001

ISBN 978-966-8689-69-7
DOI 10.30837/978-966-8689-69-7

© Ю.Ф. Павленко, І. П. Захаров, 2023
© ТОВ «Оберіг», 2023

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- ВП – вимірювальний прилад;
- ВС – вимірювальна система;
- ГКМВ (CGPM) – Генеральна конференція з мір та ваг;
- ДССДД – державна служба стандартних довідкових даних;
- ДСТУ – державний стандарт України;
- ЗВТ – засоби вимірювальної техніки;
- ЗЄВ – забезпечення єдності вимірювань;
- МБМВ (BIPM) – Міжнародне бюро з мір та ваг;
- МКМВ (CIPM) – Міжнародний комітет з мір та ваг;
- ММ – матеріальна міра;
- МТШ – міжнародна температурна шкала;
- НВЧ – надвисока частота;
- НСП – невилучена систематична похибка;
- ПП – прилад порівняння;
- РОЧМ – радіооптичний частотний міст;
- СДД – стандартні довідкові дані;
- СЗ – стандартний зразок речовин та матеріалів;
- СКВ – середньоквадратичне відхилення;
- ФВ – фізична величина;
- ФС – фізичні сталі;
- ФСС – фундаментальні фізичні сталі;
- ЦОВМ – центральний орган виконавчої влади з метрології;
- ЯМР – ядерний магнітний резонанс;
- CIPM MRA – угода про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами;
- EA – Європейська співпраця з акредитації;
- EURAMET – Європейська організація національних метрологічних інститутів;
- GUM – Настанова з подання невизначеності вимірювань;
- IEC – Міжнародна електротехнічна комісія;

IPK – Міжнародний прототип кілограму;
ISO – Міжнародна організація зі стандартизації;
JCGM – Об'єднаний комітет з настанов в метрології;
JNT – первинна термометрія шуму Джонсона;
MeP – практичні рекомендації (Mises en Pratique – MeP);
MPE – максимально допустима похибка;
NIST – Національний інститут стандартів та технологій (США);
NMI – Національний метрологічний інститут
NPL – Національна фізична лабораторія (Англія);
OIML – Міжнародна організація законодавчої метрології;
SET – одноелектронне тунелювання;
SI – Міжнародна система одиниць;
VIM – Міжнародний словник з метрології;
A – ампер;
A, B – статистичний і нестатистичний методи оцінювання невизначеності вимірювань;
C – кулон;
cd – кандела;
d – дискретність відліку ВП;
e – елементарний заряд;
f – частота коливань, модель вимірювань;
J – джоуль;
h – стала Планка;
 \hbar – стала Дірака;
Hz – герц;
k – стала Больцмана, коефіцієнт охоплення;
K – кельвін;
 K_{cd} – світлова ефективність монохроматичного випромінювання;
kg – кілограм;
L – число калібрувань, які пройшли до розглянутого моменту часу;
lm – люмен;
 $M(X)$ – молярна маса атома або молекули елемента X;
m – метр;
mol – моль;
n – число проведених багаторазових вимірювань;

N_A – стала Авогадро;
 r – коефіцієнт кореляції;
 R_H – холлівський опір;
 s – секунда;
 $t_{0,9545}(v)$ – коефіцієнт Стьюдента для ймовірності 0,9545 і числа степенів свободи v ;
 U, u – розширена і стандартна невизначеності;
 U_J – джозефсонівська напруга;
 u_A, u_B – стандартні невизначеності оцінені за типом А і В, відповідно;
 $u_c(y)$ – сумарна стандартна невизначеність вимірювань;
 W – ват;
 X_c, x_c – величина, яка вимірюється (відтворюється) ЗВТ, що калібрується, та її значення;
 X_s, x_s – величина, що вимірюється (відтворюється) еталонним ЗВТ та її значення;
 X_0, x_0 – вихідна величина компаратора та її значення;
 α – коефіцієнт, що характеризує закон розподілу вхідної величини;
 Δ – систематична похибка ЗВТ, що калібрується;
 Δ_s – додаткова похибка еталонного ЗВТ;
 Δ_c – похибка відліку (квантування) ЗВТ, що калібрується;
 Δ_0 – додаткова похибка компаратора;
 Δ_{III} – похибка нееквівалентності пристрою порівняння;
 $\Delta\nu_{Cs}$ – частота коливань цезію;
 ε – границі закону розподілу;
 ε_0 – електрична проникність вакууму (електрична стала);
 $\theta_s, \theta_{\text{III}}$ – границі складової додаткової похибки еталонного ЗВТ та приладу порівняння;
 μ_0 – магнітна проникність вакууму (магнітна стала);
 ν, ν_{eff} – число степенів свободи та ефективне число степенів свободи, відповідно.

ВСТУП

Даний навчальний посібник під назвою “Забезпечення єдності електрорадіовимірювань” витримав два видання (2011 і 2014 р.) [1, 2], але після прийняття і введення в дію у 2019 р. нової Міжнародної системи одиниць [3, 4] (далі SI-2019) застарів, оскільки SI-2019 ввела принципово нові визначення чотирьох основних одиниць (кілограма, ампера, кельвіна і моля), а для інших трьох змінила формулювання, визначивши їх через фізичні сталі. Ці зміни хоч і не привели до розриву в значеннях одиниць, але докорінно змінили методологію їх відтворення, дали “зелене світло” квантовим методам і технологіям. Частково ці методи викладено в навчальному посібнику “Вступ до квантової метрології” [5] 2013 р., але і там ці методи подано як “погляд у майбутнє” і не в повному обсязі. В даній редакції ми намагаємось дати повну картину нової – квантової системи SI, не обмежуючись електричними вимірюваннями.

Посібник складається з двох частин. **В першій частині** в розділах 1 і 3 подаються актуалізовані відомості щодо “Основ забезпечення єдності вимірювань” та “Загальних питань побудови еталонів”.

В розділі 2 “Нова SI-2019 – квантова SI” викладено принципові положення нової системи одиниць, нові визначення одиниць і інші відомості, необхідні для розуміння Нової SI. Матеріал цього розділу базується на офіційному виданні Брошури МБМВ [3], переведеної на українську мову фахівцями ННЦ “Інститута метрології” (з дозволу МКМВ) і подається в посібнику зі скороченнями непринципового характеру. У п. 2.6 цього розділу “Квантова механіка – методична основа Нової SI” подаються короткі відомості з квантової механіки і квантової метрології, на яких базується Нова SI, найбільш необхідні для розуміння матеріалу.

У розділі 4 подаються еволюція розвитку і сучасний стан первинних еталонів всіх основних одиниць у відповідності до їх визначень в системі SI-2019.

У розділі 5 викладено новий матеріал під назвою “Забезпечення простежуваності вимірювань”, який стосується обробки результатів та оцінювання невизначеності вимірювань під час передавання розміру одиниці шляхом калібрування.

У **другій частині** посібника у розділі 6 розглядаються питання відтворення (еталони) електричних, магнітних і радіотехнічних величин, а також (розділ 7) перспективи використання квантових технологій в електроніці і інформатиці.

В посібнику використовуються, головним чином, терміни і визначення відповідно до Закону “Про метрологію і метрологічну діяльність” [6] та Міжнародного словника з метрології VIM–3 [7], які вводять низку нових термінів і понять, а також відображають нові тенденції в метрології. Крім того, частина загальноприйнятих в Україні термінів, яких немає в [6, 7], беруться з діючого, хоча й застарілого стандарту ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення [8].

Матеріал посібника висвітлює розділи базових курсів спеціальності 175 – Інформаційно-вимірювальні технології: “Основи метрології та вимірювальних технологій”, “Теорія невизначеності вимірювань” “Державні еталони України”, “Сучасні еталони на основі квантових ефектів”, “Основи забезпечення простежуваності вимірювань”, “Наукові основи інформаційно-вимірювальних технологій”, “Сучасні методи забезпечення якості вимірювань”.

1. ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

1.1. Поняття єдності вимірювань

Єдність вимірювань (unity of measurements) це такий стан вимірювань, за якого їх результати виражаються в узаконених одиницях вимірювання, а характеристики похибок або невизначеності вимірювань відомі з певною ймовірністю і не виходять за встановлені границі [6].

Надаймо трактування термінів, що входять до поняття “єдність вимірювань”.

Вимірювання (measurement) – процес експериментального отримання одного чи кількох значень величини, які можна обґрунтовано віднести до величини [7].

Величина (фізична) (quantity) – властивість явища, тіла або речовини, яка може бути виражена кількісно у вигляді числа із зазначенням відмінної ознаки як основи для порівняння [7].

Одиниця вимірювань (unit of measurement) – дійсна скалярна величина, визначена і прийнята за згодою, з якою можна порівняти будь-яку іншу величину того ж роду і висловити їх відношення у вигляді числа [7].

Результат вимірювання (measurement result) – набір значень, що приписуються вимірюваній величині разом з будь-якою іншою доступною та суттєвою інформацією [7].

ПРИМІТКА. Як правило, результат вимірювання виражається одним вимірним значенням величини та невизначеністю вимірювань [7].

Результати вимірювань можуть бути використані за умови, якщо відомі відповідні характеристики похибок або невизначеності вимірювань [6].

Похибка вимірювання (measurement error) – різниця між вимірним та опорним значеннями величини [7].

Невизначеність вимірювання (measurement uncertainty) – невід’ємний параметр, який характеризує розсіювання значень величини

ни, що приписуються вимірюваній величині на підставі використовуваної інформації [7].

Забезпечення єдності вимірювань (uniformity of measurements ensuring) – діяльність, яка спрямована на досягнення і підтримку єдності вимірювань.

Забезпечення єдності вимірювань (ЗЄВ) – це головне завдання метрології. Воно є необхідним для зіставлення результатів вимірювань, виконаних у різний час, у різних місцях, різними методами і засобами, різними експериментаторами.

Для забезпечення єдності вимірювань потрібно вирішення наступних завдань:

- 1) стандартизація системи одиниць величин;
- 2) створення необхідних еталонів для відтворення розміру одиниць;
- 3) передавання розміру одиниць від еталонів робочим засобам вимірювальної техніки (ЗВТ).

1.2. Міжнародна система одиниць

В Україні у відповідності до Закону “Про метрологію та метрологічну діяльність” [6] діє Міжнародна система одиниць (SI), яка прийнята у 1960 році XI Генеральною конференцією з мір та ваг (ГКМВ). За період з 1960 р. по цей час в цю систему внесено ряд змін і поправок.

У 2018 відбулась, можливо, найбільш кардинальна реформа SI в історії її існування. Нова SI вступила в дію з травня 2019 р. [3].

При цьому було виконано ряд відомих рекомендацій МКМВ [3], зокрема:

- 1) загальна структура SI, тобто основні величини SI та їх одиниць залишилися незмінними;
- 2) нові визначення одиниць не призвели до розриву в її значеннях;
- 3) збережені всі позитивні якості системи SI (універсальність, когерентність, уніфікованість одиниць).

Розгляду SI 2019 р. присвячено окремий розділ 2 посібника.

1.3. Структура системи забезпечення єдності вимірювань

Для вирішення головного завдання метрології – забезпечення єдності вимірювань – створено метрологічну систему України – сукупність законодавчих та інших актів, організаційної структури, наукової, технічної та нормативної бази з метрології, спрямованих на забезпечення єдності вимірювань у державі.

Виходячи з цього, можна виділити такі складові системи ЗЄВ (рис. 1.1):

- правова основа;
- організаційна основа;
- наукова основа;
- технічна основа.

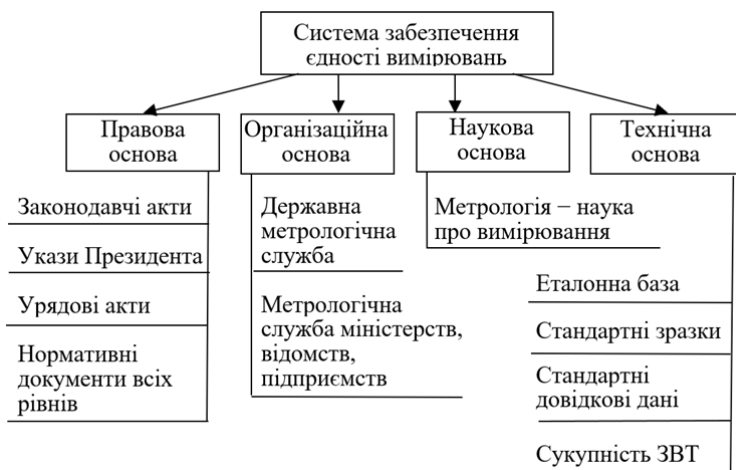


Рис. 1.1. Система забезпечення єдності вимірювань

1.3.1. Нормативно-правова основа системи ЗЄВ

Нормативно-правовою основою системи ЗЄВ є закони України, Укази Президента України, декрети та постанови Кабінету Міністрів України з питань метрології та метрологічного забезпечення.

Нормативною основою є державні стандарти та галузеві стандарти, технічні регламенти, нормативні документи різного рівня з метрології, системи загальних технічних вимог до різних видів ЗВТ, системи їх розробки, постановки на виробництво і контролю якості.

Стандарт – нормативний документ, заснований на консенсусі, прийнятий визнаним органом, що встановлює для загального і неодноразового використання правила, настанови або характеристики щодо діяльності чи її результатів, та спрямований на досягнення оптимального ступеня впорядкованості в певній сфері [9].

Таким чином, правові і нормативні основи метрологічного забезпечення становлять комплекс взаємозв'язаних і взаємообумовлених загальних правил, вимог і норм, які потребують регламентації і контролю з боку держави, направлені на забезпечення єдності вимірювання.

Загальні правила і норми встановлюються державними стандартами України (ДСТУ). До ДСТУ, крім основних стандартів, входять також державні стандарти на еталони й на методики перевірки, калібрування та атестації ЗВТ, на норми точності для окремих видів вимірювань і на типові методики виконання вимірювань.

До системи ЗЄВ органічно входить й інша нормативно-технічна документація, зокрема, методичні вказівки, інструкції, правила, типові положення та методики метрологічних інститутів.

Відомча нормативно-технічна документація (галузеві стандарти, стандарти підприємств, галузеві керівні документи з метрологічного забезпечення) розробляється за ДСТУ з урахуванням особливостей характеру роботи відомств і окремих підприємств.

1.3.2. Організаційна основа ЗЄВ

Організаційну основу системи ЗЄВ становить метрологічна служба України, яка складається з Державної метрологічної служби та метрологічних служб центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій.

Державна метрологічна служба організовує, проводить та координує діяльність, спрямовану на ЗЄВ, а також здійснює метрологічний контроль і нагляд за додержанням вимог Закону [5], технічних регла-

ментів із ЗЄВ, інших нормативно-правових актів і нормативних документів з метрології.

До Державної метрологічної служби належать:

- спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади у сфері метрології (ЦОВМ);
- державні наукові метрологічні центри, що належать до сфери управління ЦОВМ;
- територіальні (регіональні) органи ЦОВМ в Автономній Республіці Крим, областях, містах Києві та Севастополі, містах обласного значення;
- державні служби:
 - державна служба єдиного часу і еталонних частот;
 - державна служба стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів;
 - державна служба стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів;
- метрологічні служби центральних органів виконавчої влади, інших державних органів, підприємств і організацій;
- органи з оцінки відповідності ЗВТ та повірочні лабораторії.

1.3.3. Наукова основа ЗЄВ

Науковою основою забезпечення єдності вимірювань є **метрологія** – наука про вимірювання і їх використання. У залежності від видів діяльності розрізняють:

- теоретичну (фундаментальну) метрологію;
- законодавчу метрологію;
- практичну (прикладну) метрологію.

Головними завданнями сучасної метрології є [10]:

- розвиток загальної теорії вимірювань, систем одиниць вимірювань, теорії точності і методів обробки результатів вимірювань;
- подальше підвищення точності відтворення, зберігання і передачі розмірів одиниць вимірювань;
- розробка методів передачі розмірів одиниць від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки;

- розширення номенклатури вимірюваних ФВ, частотних і динамічних діапазонів;
- розробка і впровадження нових вимірювальних технологій на базі квантових ефектів, цифрової та обчислювальної техніки;
- підвищення ефективності та надійності метрологічного забезпечення в країні;
- гармонізація вітчизняної і світової метрології в усіх її аспектах.

1.3.4. Технічна основа системи ЗЄВ

Структура технічної основи системи ЗЄВ зображена на рис. 1.2.

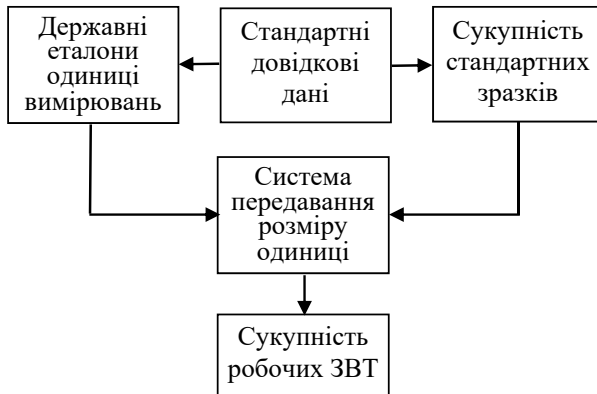


Рис. 1.2. Структура технічної основи системи ЗЄВ

До її складу входять:

- державні еталони одиниць вимірювань;
- сукупність стандартних зразків складу та властивості речовин і матеріалів;
- сукупність усіх ЗВТ у країні з інфраструктурою їх обслуговування;
- система передачі розмірів одиниць від еталонів до робочих ЗВТ;
- стандартні довідкові дані про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів.

Розглянемо основні елементи цієї системи.

1.3.4.1. Система державних еталонів

Визначення еталона в ДСТУ 2681-84 [8] сформульовано так:

Еталон (standard) – це засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та/або зберігання одиниці вимірювання одного чи декількох значень, а також передачу розміру цієї одиниці іншим засобам вимірювальної техніки.

Таким чином, у визначенні еталона закладено три функції, яким повинен володіти еталон: відтворення одиниці, її зберігання і передача.

Як показує світовий досвід, передові країни світу мають 100 – 120 первинних еталонів, в той час як кількість одиниць у різних галузях вимірювань становить кілька сотень і продовжує зростати. Сьогодні стало очевидним, що концепція “кожній одиниці – свій еталон” веде до глухого кута. Тому необхідна точність і задана ймовірність відтворення ряду одиниць забезпечується відомими співвідношеннями між одиницями, а при їх відсутності – дослідженнями зв’язку одиниць і параметрів, що використовуються в різних галузях, із загальноприйнятими в технічних і природних науках одиницями вимірювань.

У той же час для ряду особливо важливих одиниць потрібно мати кілька первинних еталонів, наприклад, для одиниці напруги – вольт: у світовій практиці створено еталони вольт для напруги постійного струму, кілька еталонів напруги змінного струму (в різних піддіапазах частот), а також еталони для високої напруги (сотні кіловольт) постійного і змінного струму.

Розгляду еталонів і їх особливостей присвячено розділ 3.

1.3.4.2. Стандартні зразки властивостей речовин та матеріалів

У відповідності до [6], **стандартний зразок** (reference material, RM) – матеріал, досить однорідний та стабільний щодо певних властивостей для того, щоб використовувати його при вимірюванні або оцінюванні якісних властивостей відповідно до передбаченого призначення.

Розрізняють **стандартні зразки властивості** і **стандартні зразки складу**. Стандартні зразки (СЗ) за метрологічним призначенням можуть використовуватися як робочі еталони і, таким чином, займають важливе

місце в системі забезпечення єдності вимірювань. Вони використовуються для градування, повірки або калібрування засобів вимірювання хімічного складу, механічних, оптичних та інших властивостей речовин і матеріалів.

СЗ використовуються у вигляді речовин (або тіл), одна із властивостей яких служить для відтворення за певних умов одиниці вимірювання, коефіцієнта чи умовної шкали [6, 9].

СЗ властиві такі ознаки: галузь використання, атестована властивість, носій властивості, значення атестованої величини та призначення (зразкова міра чи робоча міра відповідного класу точності).

При атестації СЗ точність його встановлюється у залежності від призначення. Допустимі похибки атестованого СЗ властивостей, а також його розряд чи клас точності встановлюються відповідними нормативними документами.

СЗ класифікуються за такими ознаками:

- різновидом характеристики, за якою атестується стандартний зразок (вміст, компоненти, фазовий склад, чистота речовини тощо);
- методом аналізу досліджуваних об'єктів за допомогою СЗ (хімічний, спектральний, рентгено-спектральний тощо);
- агрегатним станом (твердий, рідкий, газоподібний);
- метрологічним призначенням.

СЗ, що пройшли спеціальні випробування та одержали атестат (свідоцтво), підлягають реєстрації в державному реєстрі СЗ, який є розділом державного реєстру засобів вимірювань.

В електричних вимірюваннях СЗ використовуються для забезпечення єдності вимірювань параметрів і властивостей провідників, діелектриків, магнітотвердих і магнітом'яких матеріалів. Так, за допомогою СЗ проводяться градування і повірка вимірювальних установок за такими властивостями: діелектричною проникністю, тангенсом кута втрат, питомим опором.

Для координації всіх робіт у галузі створення і застосування СЗ, а також розробки нормативних і метрологічних документів з питань стандартних зразків створено Державну службу стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів [12].

1.3.4.3. Сукупність робочих засобів вимірювальної техніки

Засіб вимірювальної техніки, згідно з ДСТУ 2681-94 [8], це технічний засіб, який застосовується під час вимірювання і має нормовані метрологічні характеристики. Засоби вимірювальної техніки за метрологічним призначенням поділяються на робочі ЗВТ та еталонні.

Робочий ЗВТ – це засіб вимірювальної техніки, що застосовується для вимірювань, не пов'язаних з передаванням розміру одиниці фізичної величини (ФВ) іншим засобам. Робочі ЗВТ класифікуються за багатьма критеріями та ознаками, які розглядаються у відповідних курсах.

1.3.4.4. Система передачі розміру одиниць

Кількість засобів вимірювальної техніки в різних видах вимірювань може сягати сотень тисяч і навіть мільйонів одиниць, тому первинний еталон не в змозі забезпечити передачу розміру відтворюваної ним одиниці навіть невеликій частині робочих ЗВТ.

Розмір одиниці ФВ передається від державного первинного еталона, який “задає точність”, іншим ЗВТ, в загальному випадку, за допомогою “багатоповерхової” системи, куди можуть входити еталони різного рівня і робочі ЗВТ [11]. Цю систему можна подати у вигляді піраміди (рис. 1.3).

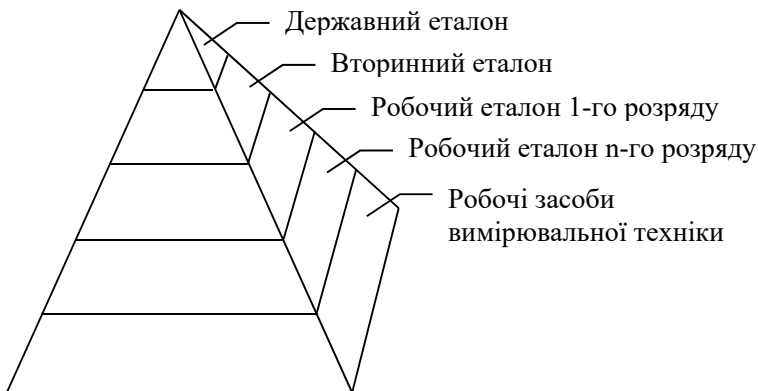


Рис. 1.3. Багатоповерхова система передавання розміру одиниці

Вершиною цієї піраміди є первинний еталон, який є єдиним у країні і має найбільшу точність. Він передає розмір одиниці вторинному еталону, а в разі його відсутності – робочому еталону 1-го розряду. Питання про необхідність створення вторинного еталона, а також кількість розрядів робочих еталонів вирішується для кожної одиниці ФВ окремо, у залежності від необхідної точності, кількості робочих ЗВТ і ряду інших критеріїв. Очевидно, чим нижче поверх цієї піраміди, тим нижче точність відповідного засобу і його вартість, але більша кількість.

Завдяки існуванню системи передавання розміру одиниці і ієрархічної схеми забезпечується простежуваність вимірювань [11].

1.3.4.5. Стандартні довідкові дані про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів

Під **стандартними довідковими даними (СДД)** розуміють дані, одержані на основі аналізу і оцінки достовірності результатів розрахунків і вимірювань та затверджені центральним органом виконавчої влади в сфері метрології.

Дослідження фізичних сталих, властивостей речовин та матеріалів, що проводяться у світі, відображаються у сотнях тисяч публікацій в різних журналах і довідниках, що видаються у багатьох країнах. З метою забезпечення збору, обробки, оцінки та стандартизації даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів, а також з метою видання довідкових матеріалів створено *Державну службу стандартних довідкових даних (ДССДД)* [12].

СДД і відповідна служба – важлива складова системи забезпечення єдності вимірювань у країні, оскільки уніфікована інформація широко використовується в науково-дослідних, проектно-конструкторських і виробничих організаціях і сприяє досягненню необхідного рівня достовірності результатів досліджень і вимірювань.

Окремо підкреслимо значення фізичних сталих (ФС) для забезпечення єдності вимірювань.

ФС – незалежні фізичні сталі, що є, як правило, характерними коефіцієнтами фундаментальних фізичних теорій. ДСТУ ISO 80000-1:2022 [13] дає таке визначення: **фундаментальна фізична стала (ФСС)** – величина, яка має незмінне значення за будь яких обставин. Значення ФФС

визначене експериментально в обраній системі одиниць, містить інформацію про найбільш загальні (фундаментальні) властивості матерії і залишається незмінним за будь-яких умов. До числа ФФС відносяться швидкість світла у вакуумі c , електрична (ϵ_0) і магнітна (μ_0) сталі, стала Планка h , елементарний заряд електрона e та інші. Розрізняють універсальні, електромагнітні, атомні та фізико-хімічні сталі.

На початку ХХ століття німецький фізик М. Планк довів, що основні одиниці можуть бути складені з фундаментальних фізичних сталих: швидкості світла c , сталої Планка h і гравітаційної сталої G . Значення цих сталих фігурують у вигляді коефіцієнтів у рівняннях основних фізичних теорій – класичній і квантовій електродинаміці та загальній теорії відносності.

Знаючи ці сталі, можна обчислити одиниці довжини $l = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-35}$, часу $t = \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} \approx 5,4 \cdot 10^{-44}$ с, і маси $m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2,2 \cdot 10^{-8}$ кг. В цих виразах $\hbar = h/2\pi$ – стала Дірака.

Однак “планківські величини” знаходяться дуже далеко від використовуваних на практиці діапазонів. Крім того, значення гравітаційної сталої дотепер відомо з недостатньою точністю.

Але найголовнішим недоліком планківських одиниць є те, що вони не відтворюються за допомогою реальних фізичних об’єктів. Саме тому планківські одиниці не використовуються в метрології.

Подальший розвиток науки і техніки, успіхи квантової фізики і технології дозволили знайти практичне використання ФФС у метрології.

Як буде показано нижче, у новій SI 2019 р. фундаментальні сталі зайняли центральне місце у визначеннях основних одиниць, що докорінно змінило і філософію, і методичну основу метрології.

1.4. Забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі

Оглядаючись назад, відзначимо, що вже в ХІХ столітті різкий підйом світової торгівлі і подальший розвиток науки і техніки привели до

усвідомлення необхідності міжнародних угод в метрології. Результатом цього з'явилося підписання в 1875 р. Метричної конвенції, що стала першою офіційною міжнародною угодою, спрямованою на забезпечення єдності одиниць вимірювань і еталонів.

Тривалий час співробітництво в рамках Метричної конвенції полягало в основному у розробці міжнародної системи одиниць і звіренні еталонів. Відтворення і передача розмірів одиниць у рамках діючих правил прикладної і законодавчої метрології залишалися в компетенції національних законодавств.

Ця ситуація істотно змінилася завдяки розвитку індустріалізації і зв'язаному з нею світовому товарообігу. Глобалізація національних економічних систем та міжнародний поділ праці сильно вплинули і на розвиток метрології.

Вимірювання та випробування тісно пов'язані з якістю продукції і, таким чином, з економікою і торгівлею. Сьогодні вимірювання в усї зростаючій мірі створюють передумови для вільного просування товарів і послуг. У зв'язку з цим виникла необхідність у створенні абсолютно прозорих систем взаємного визнання, зокрема, взаємного визнання національних еталонів і сертифікатів про калібрування, виданих національними метрологічними інститутами [14].

Якщо створення Метричної конвенції здійснювалося зверху, тобто завдяки міжурядовим переговорам, то необхідність у різних домовленостях в області калібрування і випробувань, що сприяють розвитку системи взаємного визнання, виникла в самій економіці. Вперше угода про взаємне визнання сертифікатів про калібрування була укладена між британською і німецькою калібрувальними службами. Із цієї угоди почався усї більш активний рух у цій області, що привів до розробки документа “Угода про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами” (CIPM MRA). У жовтні 1999 р. під час XXI Генеральної конференції з мір та ваг 38 країн і 2 міжнародні організації підписали угоду про першу фазу, причому двері до її підписання залишилися відкритими і для інших країн. У жовтні 2003 р. до CIPM MRA приєдналася Україна, і на кінець 2022 р. число учасників цієї угоди становить 63 країни.

Одним з наріжних каменів цієї угоди є так звані “ключові звірення”

національних еталонів, для проведення яких створені особливі правила і визначення. Введено також додаткові звірення, що проводяться винятково на регіональному рівні.

Можна сказати, що глобалізація економіки і торгівлі привела до аналогічного явища і в метрології і, зокрема, у створенні і функціонуванні еталонів. Питання збереження еталонів з національної проблеми перетворилися у глобальну. Відбувається деякий зсув центра ваги еталонних робіт з кількісної в якісну сторону – в напрямку участі в міжнародних звірваннях, що вимагає ретельної підготовки, відпрацювання методик і апаратури еталонів, глибокої експериментальної перевірки всіх метрологічних характеристик еталонів, гармонізації понять і процедур у даній сфері [14]. Україна – активний учасник цього процесу, багато її еталонів пройшли процедури міжнародних звірень і визнані у світі.

Крім того, Україна є членом ряду міжнародних організацій з метрології, зокрема, Європейської організації національних метрологічних інститутів (EURAMET), активно співпрацює з міжнародними організаціями в рамках Метричної конвенції: Генеральною конференцією з мір та ваг (CGPM), Міжнародним комітетом мір та ваг (CIPM), Міжнародним бюро мір та ваг (BIPM) та іншими організаціями.

Оскільки нормативна база – невід’ємна частина забезпечення єдності вимірювань, дуже важливим є гармонізація національних стандартів різних країн, тобто єдиного підходу до оцінки якості продукції, її характеристик, вимог до маркування, пакування, зберігання та транспортування. У міжнародній стандартизації зацікавлені як промислові країни, так і країни, що розвиваються.

Міжнародні рекомендації, наведені в стандартах, не є обов’язковими для країн, але відповідність продукції нормам міжнародних стандартів і регламентів визначає її вартість і конкурентоспроможність на світовому ринку.

Україна веде активну участь в міжнародних організаціях із стандартизації, окрім указаних, є членом Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), Міжнародної електротехнічної комісії (IEC), Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML).

Найбільш важливою подією в міжнародних відносинах стало при-

єднання України до Метричної конвенції.

Метрична конвенція – це міжурядова угода, спрямована на розробку і підтримку міжнародних еталонів одиниць вимірювання Міжнародної системи одиниць (SI). Нагадаємо, що Метричну Конвенцію було укладено у Парижі 20 травня 1875 року 17 країнами, а також утворено першу міжнародну наукову установу – Міжнародне бюро мір та ваг – BIPM.

BIPM діє під керівництвом та наглядом Міжнародного комітету мір та ваг (CIPM), який підпорядковується Генеральній конференції з мір та ваг (CGPM).

23 травня 2018 р. Верховною Радою було прийнято Закон України “Про приєднання України до Метричної конвенції” [15]. Через декілька місяців проведення офіційної процедури приєднання Міністерство закордонних та Європейських справ Франції вербальною нотою повідомило BIPM, що Україна приєдналася до Метричної Конвенції з датою приєднання 7 серпня 2018 р.

Приєднання до Метричної конвенції дає можливість користуватися цілим рядом ексклюзивних прав держави-члена, а також означає визнання метрологічної системи України на міжнародному рівні.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Для забезпечення єдності і простежуваності вимірювань (ЗЄВ) в країнах створюється відповідні національні система ЗЄВ (в різних країнах ці системи відрізняються деталями), складовими якої є нормативно-правова, організаційна, наукова та технічна основи. Така система створена і в Україні.

2. Нормативно-правовою основою системи ЗЄВ є закони України, укази Президента України, декрети та постанови Кабінету Міністрів України з питань метрології та метрологічного забезпечення.

3. Організаційну основу системи ЗЄВ становить метрологічна служба України, яка складається з Державної метрологічної служби та метрологічних служб центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій.

4. Науковою основою ЗЄВ є метрологія – наука про вимірювання та

їх застосування.

5. Технічною основою ЗЄВ є державні еталони одиниць вимірювань, сукупність стандартних зразків складу та властивості речовин і матеріалів, сукупність усіх ЗВТ у країні з інфраструктурою їх обслуговування, система передачі розмірів одиниць від еталонів до робочих ЗВТ та стандартні довідкові дані про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів.

6. Важливим елементом національної системи ЗЄВ є підтримка єдності вимірювань в міжнародному масштабі. Україна активно приймає участь в міжнародних відносинах, а найбільш важливою подією в цьому аспекті стало її приєднання до Метричної конвенції у 2018 р.

1.6. Контрольні питання

1. Назвіть складові системи забезпечення єдності вимірювань.
2. Які види нормативних документів ви знаєте?
3. Дайте визначення еталона одиниці вимірювань.
4. Що таке стандартний зразок?
5. Що складає технічну основу системи забезпечення єдності вимірювань?
6. Які державні стандарти в галузі метрології ви знаєте?
7. Що таке фундаментальні фізичні сталі? Дайте приклад ФСС.
8. Дайте визначення терміну “фізична величина”.
9. Назвіть основні фізичні величини системи SI і їх одиниці.
10. Дайте визначення терміну “єдність вимірювань”.
11. Яка система одиниць фізичних величин діє в Україні?
12. Що таке стандартні довідкові дані?

2. НОВА SI-2019 – КВАНТОВА SI

2.1. Дуже коротка історія

Міжнародна система одиниць SI використовувалася у всьому світі як краща система одиниць, як основна мова для науки, техніки, промисловості та торгівлі з часу її створення у 1960 р. на 11-му засіданні Генеральної конференції з мір та ваг (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM).

Система одиниць SI завжди була практичною та динамічною системою, яка розвивалася з використанням останніх науково-технічних розробок. Зокрема, надзвичайний прогрес в атомній фізиці та квантовій метрології, досягнутий за останні 50 років, дав визначення секунді та метру, а також забезпечив практичне відтворення електричних одиниць із використанням атомних та квантових явищ для досягнення рівнів точності їх реалізації, обмежених лише нашими технічними можливостями, а не самими визначеннями. Ці досягнення науки разом із розробкою технологій вимірювань дозволили внести далекосяжні зміни до SI, які увійшли в дію у 2019 після прийняття 26-м засіданням CGPM.

Засідання запровадило новий підхід до формулювання визначень одиниць загалом та, зокрема, семи основних одиниць, встановивши числові значення семи “визначальних” сталих. Серед них є фундаментальні сталі природи, такі як стала Планка та швидкість світла, таким чином визначення являють собою сучасне розуміння законів фізики. Вперше стала доступною повна низка визначень, яка не посиляється на будь-які еталони у вигляді артефактів, властивості матеріалу або описи вимірювань.

Ці зміни дозволяють реалізувати всі одиниці з точністю, яка в кінцевому рахунку обмежується лише квантовою структурою природи та нашими технічними можливостями. Будь-яке дійсне рівняння фізики, що пов’язує визначальну сталу з одиницею, може бути використане для реалізації одиниці, створюючи, таким чином, можливості для збільшення точності у процесі розвитку технологій. Таким чином, це перевизначення є значним та історичним кроком уперед.

Зміни було узгоджено CGPM у листопаді 2018 р., вони набрали чинності з 20 травня 2019 р., дати Всесвітнього дня метрології, дня підписання Метричної конвенції у 1875 р.

2.2. SI та визначальні сталі

У 1960 р. 11-та CGPM формально визначила одиниці й створила систему SI, а потім періодично переглядала її внаслідок досягнень у науці й техніці. Найостанніший та, можливо, найзначніший перегляд системи SI з моменту її створення відбувся на 26-й CGPM у 2018 р.

SI – це узгоджена система одиниць для використання у всіх сферах життя, включаючи міжнародну торгівлю, виробництво, безпеку, охорону здоров'я, захист навколишнього середовища й фундаментальні науки, що лежать в основі всього переліченого вище. Система величин, що лежать в основі SI, й рівняння, які пов'язують їх, базуються на сучасному описі природи та є загальновідомими для всіх вчених, технологів, а також інженерів.

Визначення одиниць SI-2019 [3] встановлюється через сім визначальних сталих. Повну систему одиниць може бути отримано з фіксованих значень цих визначальних сталих, виражених в одиницях SI. Ці сім визначальних сталих є найголовнішою ознакою визначення всієї системи одиниць. Ці окремі сталі було обрано після визначення їх як найкращих, враховуючи прогрес у науковій діяльності й попереднє визначення SI, що базувалося на семи основних одиницях.

Для реалізації цих визначень можуть бути використані різноманітні експериментальні методи, описані Консультативними комітетами CIPM. Документи, що містять описи цих реалізацій, також називають “*практичні рекомендації*” (Mises en Pratique – MeP).

Основу системи SI складають сім – найактуальніша кількість на сьогодні – *основних одиниць*. Усі інші одиниці, що називаються *похідними*, формуються як добутки степенів основних одиниць.

Для основних одиниць використовувались різні типи визначень: специфічні властивості артефактів, наприклад, маса міжнародного прототипу (IPK) для одиниці кілограма; специфічний фізичний стан, такий як потрійна точка води для одиниці кельвіна; ідеалізовані експеримен-

тальні специфікації (приписи), як у випадку ампера й кандели; або природні сталі – швидкість світла для визначення одиниці метра.

Задля того, щоб мати будь-яке практичне використання, ці одиниці мають бути не тільки визначені, але й також реалізовані з фізичної точки зору для поширення. У SI-2019 реалізації концептуально відокремлені від визначень, так щоб одиниці можна було фактично реалізувати незалежно в будь-якому місці та в будь-який час. Крім того, нові й високоточні реалізації можуть бути впроваджені паралельно з розвитком науки й технологій, не потребуючи при цьому перевизначення тієї чи іншої одиниці. Ці переваги – найбільш очевидно спостерігаються з історії визначення метра: за допомогою артефактів через атомний референтний перехід (у кріптоні) до фіксованого числового значення швидкості світла – обумовили рішення про визначення всіх одиниць за допомогою визначальних сталих.

Визначення одиниць SI-2019, надані CGPM, являють найвищий референтний рівень для простежуваності вимірювань до SI.

2.3. Визначення фундаментальних сталих у SI-2019

Значення будь-якої величини зазвичай виражається як добуток числа й одиниці величини. Остання є просто конкретним прикладом відповідної величини, що використовується як еталон, а число – це відношення значення цієї величини до одиниці.

При поданні результату вимірювання величини необхідними є *оцінене значення* вимірюваної величини (величини, що підлягає вимірюванню) та *невизначеність*, пов'язана з цим значенням. Обидва виражаються в одній і тій самій одиниці вимірювання.

Як і будь-яку величину, значення фундаментальної сталої можна виразити як добуток числа й одиниці.

Визначення, наведені нижче, задають точне числове значення кожної сталої, значення якої виражається у відповідній одиниці SI. Внаслідок фіксування точного числового значення одиниця стає визначеною, оскільки добуток *числового значення* та *одиниці* має дорівнювати *значенню* сталої, що приймається як інваріантне.

Сім сталих обрано так, що будь-яку одиницю SI можна записати або через визначальну сталу, або через добутки, або через коефіцієнти визначальних сталих (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Сім визначальних сталих SI і сім відповідних одиниць, які вони визначають

Визначальна стала	Позначення	Числове значення	Одиниця
Частота переходів між рівнями надтонкої структури атома цезію	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz
Швидкість світла у вакуумі	c	299 792 458	$m \cdot s^{-1}$
Стала Планка	h	$6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$	J·s
Елементарний заряд	e	$1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$	C
Стала Больцмана	k	$1,380\ 649 \times 10^{-23}$	J·K ⁻¹
Стала Авогадро	N_A	$6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$	mol ⁻¹
Світлова ефективність	K_{cd}	683	lm·W ⁻¹

Міжнародна система одиниць SI – це система одиниць, в якій:

- незбурена частота переходів між рівнями надтонкої структури атома цезію-133 в основному стані, $\Delta\nu_{Cs}$, дорівнює 9 192 631 770 Hz;
- швидкість світла у вакуумі, c , дорівнює 299 792 458 m/s;
- стала Планка, h , дорівнює $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J·s;
- елементарний заряд, e , дорівнює $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C;
- стала Больцмана, k , дорівнює $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K;
- стала Авогадро, N_A , дорівнює $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹;
- світлова ефективність монохроматичного випромінювання частотою 540×10^{12} Hz, K_{cd} , дорівнює 683 lm/W.

Тут герц (Hz), джоуль (J), кулон (C), люмен (lm) і ват (W) пов'язані з основними одиницями системи SI – секундою (s), метром (m), кілограмом (kg), ампером (A), кельвіном (K), молям (mol) і канделою (cd). Цей зв'язок виражається такими відношеннями:

$$Hz = s^{-1}; J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}; C = A \cdot s; lm = cd \cdot m^2 \cdot m^{-2} = cd \cdot sr; W = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}.$$

Числові значення семи визначальних сталих не мають невизначеності.

Збереження незмінності, наскільки це можливо, завжди було важливим при будь-яких змінах до Міжнародної системи одиниць. Числові значення визначальних сталих було обрано так, щоб вони погоджува-

лися з попередніми визначеннями настільки, наскільки дозволяють досягнення науки та пізнання.

Використання тієї чи іншої сталої для визначення одиниці відокремлює визначення від реалізації. Це дозволяє розробити цілком різні або нові й передові практичні реалізації у міру розвитку технологій, водночас не потребуючи зміни визначення.

Набір із семи визначальних сталих було обрано для забезпечення фундаментального, стабільного й універсального орієнтиру, що одночасно дозволяє здійснювати практичні реалізації з найменшими значеннями невизначеності.

Як *стала Планка h* , так і стала – *швидкість світла у вакуумі c* – належним чином описані як фундаментальні. Вони визначають квантові ефекти та просторово-часові властивості відповідно.

Елементарний заряд e відповідає силі зв'язку електромагнітної сили через сталу тонкої структури $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$, де ϵ_0 – це електрична проникність вакууму або електрична стала.

Стала Больцмана k – коефіцієнт пропорційності між такими величинами, як температура (виражена в одиниці кельвін) та енергія (виражена в одиниці джоуль), завдяки чому числове значення отримується на основі історичних уточнень температурної шкали.

Частота коливань цезію $\Delta\nu_{Cs}$ – незбурена частота переходів між рівнями надтонкої структури атома цезію-133 в основному стані, має характер атомного параметра, на який може впливати середовище, наприклад, електромагнітні поля. Однак базовий перехід є добре зрозумілим, стабільним і надійним вибором для референтного переходу з практичних міркувань.

Стала Авогадро N_A – коефіцієнт пропорційності між величиною кількості речовини (вираженої в одиниці моль) і величиною кількісних частинок (виражених в одиниці один, позначення 1).

Світлова ефективність монохроматичного випромінювання частотою 540×10^{12} Hz, K_{cd} – це технічна стала, що дає точну числову залежність між суто фізичними характеристиками потужності випромінювання, яка стимулює людське око (W), та її фотобіологічною чутливістю, визначеною світловим потоком спектральній чутливості стандартного спостерігача (lm) при частоті 540×10^{12} Hz (частота найкращої чутливості людського ока).

2.4. Визначення одиниць SI-2019

До 2018 р. SI включала сім *основних одиниць*, із яких походили інші одиниці як добутки степенів основних одиниць – *похідні одиниці*. Визначення SI-2019 фіксуванням числових значень семи визначальних сталих зумовлює те, що ця відмінність фактично не потрібна, оскільки всі одиниці, як основні, так і похідні, можна вивести безпосередньо з визначальних сталих. Проте концепція основних і похідних одиниць зберігається, оскільки вона є корисною та обґрунтованою з історичної точки зору, зазначаючи також, що серія стандартів ISO/IEC 80000 [11] визначає основні й похідні величини, що обов'язково відповідають основним і похідним одиницям SI, визначеним у цій публікації.

2.4.1. Основні одиниці

Основні одиниці SI наведені в табл. 2.2¹.

Таблиця 2.2

Основні одиниці SI

Основна величина		Основна одиниця	
назва	позначення	назва	позначення
Час	t	секунда	s
Довжина	l, x, r ; тощо	метр	m
Маса	m	кілограм	kg
Сила електричного струму	I, i	ампер	A
Термодинамічна температура	T	кельвін	K
Кількість речовини	n	моль	mol
Сила світла	I_v	кандела	cd

Починаючи з визначення SI через фіксовані числові значення визначальних сталих, визначення кожної з семи основних одиниць виводяться, використовуючи (залежно від умов, коли це є доцільним) одну або

¹ *Примітка:* Для позначення величин здебільшого беруться окремі літери латинського чи грецького алфавітів, надруковані курсивом. Ці позначення є *рекомендованими*. Для позначення одиниць літери друкуються прямим (roman) шрифтом. Ці позначення є *обов'язковими*.

більше з цих визначальних сталих для надання визначень семи основних одиниць SI, що наведені нижче.

Секунда

Секунда, позначення s , є одиницею часу в SI. Вона визначається прийняттям фіксованого числового значення частоти $\Delta\nu_{Cs}$ надтонкого переходу атома цезію-133 в незбуреному основному стані, що дорівнює 9 192 631 770, вираженого одиницею Hz, яка дорівнює s^{-1} .

Згідно з цим визначенням маємо точне відношення $\Delta\nu_{Cs}=9\,192\,631\,770\text{ Hz}$. З цього відношення маємо вираження одиниці секунди через визначальну сталу $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{Cs}}{9192631770} \text{ або } 1\text{ s} = \frac{9192631770}{\Delta\nu_{Cs}}.$$

У цьому визначенні йдеться про те, що секунда дорівнює 9 192 631 770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

Зазначення незбуреного атома призначене для розуміння того, що це визначення секунди SI ґрунтується на ізольованому атомі цезію, який не збурюється жодним зовнішнім полем, наприклад, навколишнім випромінюванням чорного тіла.

Визначена в такий спосіб секунда є одиницею власного часу в розумінні загальної теорії відносності. Для забезпечення координованої шкали часу поєднуються сигнали від різних первинних годинників у різних локаціях, що необхідно коригувати, зважаючи на релятивістські зміщення значень частоти цезію (див. розділ 4.1.2).

Метр

Метр, позначення m , є одиницею довжини в SI. Він визначається прийняттям фіксованого числового значення швидкості світла у вакуумі c , що дорівнює 299 792 458, вираженого одиницею $m \cdot s^{-1}$, де секунда визначається через частоту $\Delta\nu_{Cs}$.

Згідно з цим визначенням маємо точне відношення $c=299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

З цього відношення одержуємо точне вираження метра через визначальні сталі c і $\Delta\nu_{Cs}$:

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

З цього визначення виходить, що один метр – це довжина шляху, який проходить у вакуумі світло за 1/299 792 458 частину секунди.

Кілограм

Кілограм, позначення kg , є одиницею маси в SI. Він визначається прийняттям фіксованого числового значення сталої Планка h , що дорівнює $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$, вираженої в одиниці $\text{J} \cdot \text{s}$, що дорівнює $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, де метр і секунда визначені через c і Δv_{Cs} .

Згідно з цим визначенням маємо точне відношення $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. З цього відношення одержуємо точне вираження кілограма через три визначальні сталі: h , Δv_{Cs} і c :

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,62607015 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s},$$

що дорівнює

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

У цьому визначенні йдеться про визначення одиниці $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (як одиниці фізичної величини дії, так і одиниці фізичної величини моменту імпульсу). Разом із визначеннями секунди й метра це зумовлює визначення одиниці маси через сталу Планка h .

Попереднє визначення кілограма фіксувало значення маси міжнародного прототипу кілограма, $m(K)$, що дорівнювала одному кілограму точно, а значення сталої Планка h мало визначатися експериментально. Згідно з нинішнім визначенням фіксується числове значення h точно, а масу прототипу тепер необхідно визначати експериментально.

Треба зауважити, що згідно з нинішнім визначенням первинні реалізації можна здійснити фактично в будь-якій точці шкали маси.

Ампер

Ампер, позначення A , є одиницею сили електричного струму в SI. Він визначається прийняттям фіксованого числового значення елемен-

тарного заряду e , що дорівнює $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, вираженого одиницею C , яка дорівнює $A \cdot s$, де секунда визначається через $\Delta\nu_{Cs}$.

Згідно з цим визначенням маємо точне відношення $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19} A \cdot s$. З цього відношення одержуємо точне вираження одиниці ампера через визначальні сталі e і $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1 A = \left(\frac{e}{1,602176634 \times 10^{-19}} \right) s^{-1},$$

що дорівнює

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

У цьому визначенні йдеться про те, що один ампер – це електричний струм, який відповідає потоку $1/(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ елементарних зарядів, що рухаються через перетин провідника за секунду.

Попереднє визначення ампера базувалося на силі взаємодії двох провідників і фіксуванні значення магнітної проникності вакууму μ_0 (також відомої як магнітна стала), $4\pi \times 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$ точно, де Н і Н позначають когерентні похідні одиниці генрі й ньютон відповідно. Згідно з новим визначенням ампера замість μ_0 фіксується значення e . У результаті значення μ_0 має визначатися експериментально.

Також впливає те, що значення ε_0 , Z_0 і Y_0 мають тепер також визначатися експериментально, оскільки електрична проникність вакууму ε_0 (також відома як електрична стала), характеристичний імпеданс вакууму Z_0 і провідність вакууму Y_0 дорівнюють $1/\mu_0 c^2$, $\mu_0 c$ і $1/\mu_0 c$ відповідно. На значення ε_0 , Z_0 і Y_0 також впливає та сама відносна стандартна невизначеність, що й на μ_0 , оскільки значення c відоме точно. Добуток $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ і частка $Z_0/\mu_0 = c$ залишаються точними. На момент прийняття нинішнього визначення ампера μ_0 дорівнювала $4\pi \times 10^{-7} \text{ Н/м}$ з відносною стандартною невизначеністю $2,3 \times 10^{-10}$.

Кельвін

Кельвін, позначення K , є одиницею термодинамічної температури в SI. Він визначається прийняттям фіксованого числового значення сталої Больцмана k , що дорівнює $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, вираженого одиницею

$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, яка дорівнює $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, де кілограм, метр і секунда визначаються через h , c і $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Згідно з цим визначенням маємо точне відношення $k=1,380\,649\times 10^{-23}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. З цього відношення одержуємо точне вираження кельвіна через визначальні сталі k , h і $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1\text{ K} = \left(\frac{1,380649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kgm}^2\text{s}^{-2},$$

що дорівнює

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

У цьому визначенні йдеться про те, що один кельвін дорівнює зміні термодинамічної температури, що зумовлює зміну теплової енергії kT на $1,380\,649\times 10^{-23}$ J.

Згідно з попереднім визначенням кельвіна встановлювалася температура потрійної точки води, T_{TPW} , 273,16 K точно. У зв'язку з тим, що згідно з нинішнім визначенням кельвіна замість T_{TPW} фіксується числове значення k , перша має тепер визначатися експериментально. На момент прийняття нинішнього визначення кельвіна T_{TPW} дорівнювала 273,16 K з відносною стандартною невизначеністю $3,7\times 10^{-7}$ на основі вимірювань k , проведених до перевизначення.

Залишається загальною практикою виражати термодинамічну температуру, T , через її різницю з референтним значенням температури $T_0 = 273,15$ K (близько до температури замерзання води). Ця різниця називається температурою за шкалою Цельсія, t , що визначається таким рівнянням зв'язку:

$$t = T - T_0.$$

Одиниця температури за шкалою Цельсія – це градус Цельсія, позначення $^{\circ}\text{C}$, що за розміром дорівнює одиниці кельвіну. Різницю або інтервал температур можна виразити в кельвінах або в градусах Цельсія – числове значення різниці температур буде однакове в будь-якому разі. Проте числове значення температури, виражене в градусах Цельсія, пов'язане з числовим значенням термодинамічної температури в кельвінах таким відношенням:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15.$$

Кельвін і градус Цельсія є також одиницями Міжнародної температурної шкали 1990 р. (МТШ-90), прийнятої СІРМ у 1989 р., Треба зазначити, що згідно з нинішнім визначенням кельвіна первинні реалізації одиниці термодинамічної температури можна здійснити фактично в будь-якій точці температурної шкали.

Моль

Моль, позначення mol, є одиницею кількості речовини в SI. Один моль містить точно $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ структурних елементів. Це число є фіксованим числовим значенням сталої Авогадро, N_A , вираженою одиницею mol^{-1} , і називається числом Авогадро.

Кількість речовини системи, символ n , є мірою числа точно визначених структурних елементів. Структурним елементом може бути атом, молекула, іон, електрон, будь-яка інша частинка або точно виражена група частинок.

Згідно з цим визначенням маємо точне відношення $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. З цього відношення одержуємо точне вираження моля через визначальну сталу N_A :

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}}{N_A} \right).$$

У цьому визначенні йдеться про те, що моль є кількістю речовини будь-якої системи, що містить $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ визначених структурних елементів.

Попереднє визначення моля фіксувало значення молярної маси вуглецю-12, $M(^{12}\text{C})$, $0,012 \text{ kg/mol}$ точно. Згідно з нинішнім визначенням моля $M(^{12}\text{C})$ вже не є відомою точно й має тепер визначатися експериментально. Значення, обране для N_A , є таким, що на момент прийняття нинішнього визначення моля $M(^{12}\text{C})$ дорівнювала $0,012 \text{ kg/mol}$ з відносною стандартною невизначеністю $4,5 \times 10^{-10}$.

Молярну масу будь-якого атома або молекули X все ще можна отримати з її відносної атомної маси за таким рівнянням:

$$M(X) = A_r(X)[M(^{12}\text{C})/12] = A_r(X)M_u,$$

а молярна маса будь-якого атома або молекули X також пов'язана з масою елементарної частинки $m(X)$ таким відношенням:

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u.$$

У цих рівняннях M_u – це стала молярної маси, що дорівнює $M(^{12}\text{C})/12$, а m_u – стала атомної маси, що дорівнює $m(^{12}\text{C})/12$. Вони пов'язані зі сталою Авогадро таким відношенням:

$$M_u = N_A m_u.$$

Кандела

Кандела, позначення cd, є одиницею сили світла в заданому напрямку в SI. Вона визначається прийняттям фіксованого числового значення світлової ефективності монохроматичного випромінювання частотою 540×10^{12} Hz, K_{cd} , що дорівнює 683, вираженого одиницею $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, яка дорівнює $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$, або $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, де кілограм, метр і секунда визначені через h , c і $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Згідно з цим визначенням маємо точне відношення $K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ для монохроматичного випромінювання частотою $\nu = 540 \times 10^{12}$ Hz. О з цього відношення одержуємо точне вираження кандели через визначальні сталі K_{cd} , h і $\Delta\nu_{\text{Cs}}$:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{\text{cd}}}{683} \right) \text{kgm}^2 \text{s}^{-3} \text{sr}^{-1},$$

що дорівнює

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

У цьому визначенні йдеться про те, що одна кандела – це сила світла в заданому напрямку джерела, що поширює монохроматичне випромінювання частотою 540×10^{12} Hz і має силу випромінювання в цьому напрямку $(1/683) \text{ W/sr}$. Визначення стерadiana наведено в табл. 2.4 (пункт 2.4.4).

2.4.2. Практична реалізація одиниць SI

Експериментальні методи найвищого рівня, що використовуються для реалізації одиниць за допомогою рівнянь фізики, відомі як **первинні** мето-

ди. Суттєвою характеристикою первинного методу є те, що він дозволяє вимірювати величину в певній одиниці, використовуючи лише вимірювання величин, які не включають цю одиницю. У нинішньому формулюванні SI основа визначень відрізняється від раніше використовуваних тим, що нові методи можуть використовуватися для практичної реалізації одиниць SI.

Замість того, щоб кожне визначення конкретизувало певну умову або фізичний стан, що встановлює принципову межу точності реалізації, користувач тепер може вибирати будь-яке придатне рівняння фізики, яке пов'язує визначальні сталі з величиною, що необхідно виміряти. Це дедалі більш загальний спосіб визначення основних одиниць вимірювання. Він не обмежується сьгоднішніми досягненнями науки чи технологій; майбутні розробки можуть забезпечити різні способи реалізації одиниць із вищою точністю. Якщо одиниця визначена в такий спосіб, то фактично немає жодних меж точності її реалізації.

Винятком залишається визначення секунди, в якому початковий мікрохвильовий перехід цезію наразі мусить залишатися основою визначення.

2.4.3. Розмірності величин

Кожна з семи основних величин, що використовуються в SI, має свою розмірність. Позначення, використані для основних величин, і позначення, що використовуються для вказівки їхніх розмірностей, наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3
Основні величини й розмірності, що використовуються в SI

Основна величина	Типове позначення величини	Позначення розмірності
Час	t	T
Довжина	l, x, r , тощо	L
Маса	m	M
Сила електричного струму	I, i	I
Термодинамічна температура	T	Θ
Кількість речовини	n	N
Сила світла	I_v	J

2.4.4. Похідні одиниці SI

Усі інші величини, за винятком перерахованих, є похідними величинами, які можна записати, застосовуючи основні величини згідно з рівняннями фізики.

Розмірності похідних величин записуються як добутки степенів розмірностей основних величин, використовуючи рівняння, що пов'язують похідні величини з основними.

Взагалі розмірність будь-якої величини Q записується у вигляді добутку розмірностей:

$$\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \theta^\varepsilon N^\zeta J^\eta,$$

де експоненти α , β , γ , δ , ε , ζ і η , що, як правило, є малими цілими числами, які можуть бути позитивними, негативними або нулем, називаються показниками розмірності.

Існують величини Q , для яких визначальне рівняння є таким, що всі показники розмірності в рівнянні для розмірності величини Q дорівнюють нулю.

Це стосується, зокрема, будь-якої величини, що визначається як відношення двох величин одного виду. Наприклад, показник заломлення – це відношення двох швидкостей, а відносна діелектрична проникність – відношення проникності діелектричного середовища до проникності вакууму. Такі величини є просто числами.

Похідні одиниці визначаються як добутки степенів основних одиниць. Коли числовий коефіцієнт цього добутку дорівнює одиниці, похідні одиниці називаються *когерентними похідними одиницями*.

Основні й когерентні похідні одиниці SI утворюють когерентний набір – *набір когерентних одиниць SI*. Слово “когерентний” означає, що рівняння між числовими значеннями величин приймають абсолютно таку саму форму, що й рівняння між самими величинами.

Деякі з когерентних похідних одиниць в SI отримують спеціальні назви. У табл. 2.4 наведено 22 одиниці SI зі спеціальними назвами. Разом із основними одиницями, яких сім (табл. 2.2), вони утворюють ядро набору одиниць SI. Всі інші одиниці SI – це комбінації деяких із цих 29 одиниць. Оскільки кількість величин не є обмеженою, неможливо надати повний перелік похідних величин і похідних одиниць.

Важливо зазначити, що будь-яку з семи основних одиниць і 22 одиниць SI зі спеціальними назвами можна безпосередньо вивести з семи визначальних сталих. Насправді ж одиниці семи визначальних сталих включають як основні, так і похідні одиниці.

У табл. 2.5 наведено деякі приклади похідних величин і відповідних когерентних похідних одиниць, виражених через основні одиниці.

Таблиця 2.4
Одиниці SI зі спеціальними назвами й позначеннями

Похідна величина	Спеціальна назва одиниці	Одиниця, виражена через основні одиниці ^(a)	Одиниця, виражена через інші одиниці SI
Площинний кут	радіан	rad = m/m	
Тілесний кут	стерадіан	sr = m ² /m ²	
Частота	герц	Hz = s ⁻¹	
Сила	ньютон	N = kg·m·s ⁻²	
Тиск, механічне навантаження	паскаль	Pa = kg·m ⁻¹ ·s ⁻²	
Енергія, робота, кількість теплоти	джоуль	J = kg·m ² ·s ⁻²	N·m
Потужність, потік випромінювання	ват	W = kg·m ² ·s ⁻³	J/s
Електричний заряд	кулон	C = A·s	
Різниця електричних потенціалів ^(e)	вольт	V = kg·m ² ·s ⁻³ ·A ⁻¹	W/A
Ємність	фарад	F = kg ⁻¹ ·m ⁻² ·s ⁴ ·A ²	C/V
Електричний опір	ом	Ω = kg·m ² ·s ⁻³ ·A ⁻²	V/A
Електрична провідність	сименс	S = kg ⁻¹ ·m ⁻² ·s ³ ·A ²	A/V
Магнітний потік	вебер	Wb = kg·m ² ·s ⁻² ·A ⁻¹	V·s
Магнітна індукція	тесла	T = kg·s ⁻² ·A ⁻¹	Wb/m ²
Індуктивність	генрі	H = kg·m ² ·s ⁻² ·A ⁻²	Wb/A
Температура за шкалою Цельсія	градус Цельсія	°C = K	
Світловий потік	люмен	lm = cd·sr ^(g)	cd·sr
Освітленість	люкс	lx = cd·sr·m ⁻²	lm/m ²
Активність радіонукліду ^(d,h)	бекерель	Bq = s ⁻¹	
Поглинута доза, керма	грей	Gy = m ² ·s ⁻²	J/kg
Еквівалентна доза	зіверт	Sv = m ² ·s ⁻²	J/kg
Каталітична активність	катал	kat = mol·s ⁻¹	

Таблиця 2.5

Приклади когерентних похідних одиниць SI,
виражених через основні одиниці

Похідна величина	Позначення величини	Похідна одиниця, виражена через основні одиниці
Площа	A	m^2
Об'єм	V	m^3
Швидкість	v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Прискорення	a	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Хвильове число	σ	m^{-1}
Густина, масова густина	ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Поверхнева густина	ρ_A	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
Питомий об'єм	v	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Густина електричного струму	j	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
Напруженість магнітного поля	H	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
Концентрація кількості речовини	c	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
Масова концентрація	ρ, γ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Яскравість	L_v	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$

2.4.5. Одиниці SI в рамках загальної теорії відносності

Практична реалізація будь-якої одиниці й процес звірення вимагають набору рівнянь у рамках теоретичного опису. У деяких випадках ці рівняння включають релятивістські ефекти.

Для еталонів частоти можна організувати звірення на відстані за допомогою електромагнітних сигналів. Для інтерпретації цих результатів необхідна загальна теорія відносності, оскільки вона, серед іншого, передбачає відносний зсув частоти між еталонами – приблизно 1×10^{-16} на метр різниці висот на поверхні землі. При звірненні кращих еталонів частоти ефекти такої величини мають бути виправлені.

Коли практичні реалізації звірюються локально, тобто в невеликій просторово-часовій області, ефектами, що зумовлені описаним загальною теорією відносності викривленням просторово-часової області, можна знехтувати. Коли реалізації мають однакові просторово-часові координати (наприклад, однакове поле руху, прискорення або гравітаційне поле), релятивістськими ефектами можна повністю знехтувати.

2.5. Десяткові кратні й частинні одиниць SI

Десяткові кратні й частинні одиниць SI (від 10^{24} до 10^{-24}) передбачені для використання з одиницями SI. Назви й позначення префіксів кратних і частинних одиниць SI наведено у табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Префікси одиниць SI

Множник	Назва	Позначення	Частка	Назва	Позначення
10^1	дека	da	10^{-1}	деци	d
10^2	гекто	h	10^{-2}	санти	c
10^3	кіло	k	10^{-3}	мілі	m
10^6	мега	M	10^{-6}	мікро	μ
10^9	гіга	G	10^{-9}	нано	n
10^{12}	тера	T	10^{-12}	піко	p
10^{15}	пета	P	10^{-15}	фемто	f
10^{18}	екса	E	10^{-18}	ато	a
10^{21}	зета	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	йота	Y	10^{-24}	йокто	y

Префікси одиниць SI відносяться строго до степенів числа 10. Вони не мають використовуватися для вказання на степінь числа 2 (наприклад, один кілобіт містить одну тисячу біт, а не 1024 біт). Для використання зі степенями числа 2 рекомендуються назви й позначення префіксів, наведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Позначення префіксів зі степенями числа 2

Назва	Позначення	Множник
кібі	Ki	2^{10}
мебі	Mi	2^{20}
гібі	Gi	2^{30}
тебі	Ti	2^{40}
пебі	Pi	2^{50}
ексбі	Ei	2^{60}
зебі	Zi	2^{70}
йобі	Yi	2^{80}

В брошурі SI також наводяться такі відомості, які наводяться в Додатку 1 цього посібника:

- не-SI одиниці, прийняті для використання разом із SI (табл. Д.1.1);
- приклади когерентних похідних одиниць SI, назви й позначення яких включають когерентні похідні одиниці SI зі спеціальними назвами й позначеннями використання позначень і назв одиниць (табл. Д.1.2).

2.6. Квантова фізика (механіка) – методична основа Нової SI

Сучасна фізика виділяє три структурних рівня простору:

– **мікросвіт**, який включає до себе молекули, атоми, елементарні частинки – світ гранично малих об'єктів, що безпосередньо не спостерігається. Розміри цих об'єктів знаходяться в межах від 10^{-8} до 10^{-16} м, час життя – від нескінченності до 10^{-24} с;

– **макросвіт** – світ стійких форм і сумірних людському досвіду розмірів (міліметри – кілометри) і часу існування (секунди – роки). Це світ комплексів молекул і об'єктів, з якими людина має справи і працює в повсякденному житті;

– **мегасвіт** – це планети, зоряні комплекси, галактики і мегагалактики; простір мегасвіту – світлові роки, час обчислюється мільйонами і мільярдами років.

Як відомо, теоретично всі явища і об'єкти матеріального світу володіють корпускулярно-хвильовим дуалізмом, який характеризується наявністю у об'єктів протилежних властивостей: **корпускулярних** (дискретних) і **хвильових** (безперервних). Але виявляється цей дуалізм лише в **мікросвіті**, і його фізичною основою є квантова механіка.

В **макросвіті** діють, в основному, закони класичної механіки **І. Ньютона**, а також закони термодинаміки, електромагнетизму тощо. Це світ, в якому ми живемо і працюємо, в якому діє класична (практична) метрологія, міжнародна система одиниць SI (до 2019 р.) і на основі фізичних законів якої діють більшість існуючих сьогодні засобів вимірювань.

Нова SI, а саме, перехід на визначення одиниць вимірювання через ФС, веде метрологію з світу класичної механіки в світ квантової меха-

ніки (розділ квантової фізики), в якому діють, точніше, проявляють себе (фізика єдина) зовсім інші закони [16, 17].

2.6.1. Елементи квантової фізики

Квантова фізика – фізика мікросвіту, яка вивчає закони руху мікрооб'єктів на просторах, сумірних з розмірами самих об'єктів (від 10^{-8} і менше) [18, 19].

Предтечами квантової фізики були відкриття електрона, x – проміней (які згодом назвали рентгенівськими), лінійчастоті спектрів випромінювання (*ліній Бальмера*) тощо. Але початком квантової фізики прийнято вважати відкриття **М. Планком** дискретності випромінювання і народження квантової формули, яка одержала його ім'я [17]. Квантову фізику поділяють на квантову механіку і квантову теорію поля.

2.6.1.1. Квантова формула Планка

У 1900 р. видатний фізик Макс Планк, всупереч існуючому уявленню про неперервність процесів випромінювання і поглинання електромагнітних хвиль (і світла), висловив гіпотезу, що ці процеси відбуваються не неперервно, а окремими, хоч і дуже малими порціями. Як таку порцію Планк запропонував квант енергії E_0

$$E_0 = h \nu,$$

де h – стала Планка (сам Планк називав її “одичиною дією”), яка дорівнює $6,62 \dots 10^{-14}$ Дж·с; ν – частота.

Формула Планка добре узгоджувалась з результатами експериментів і зняла ряд протиріч [17, 19].

2.6.1.2. Роботи Ейнштейна і зовнішній фотоефект

У 1905 р. Альберт Ейнштейн розвинув ідеї Планка, він прийшов до висновку, що не тільки випромінювання і поглинання, а й розповсюдження світла повинно відбуватись у вигляді окремих порцій енергії – квантів, які назвали **фотонами** (класична оптика розглядала світло як неперервний хвильовий процес). Одним з квантових явищ є виривання

електронів з твердих і рідких тіл під дією світла. Це явище було названо зовнішнім фотоелектричним ефектом (або просто фотоелектом), а струм, що виникає при цьому, фотострумом. Квантове тлумачення природи світла дозволило по новому пояснити закони фотоелекту, зокрема, той факт, що кінетична енергія фотоелекту залежить від частоти світла ν і роботи виходу A_0 , а не від інтенсивності світла (перший закон).

Крім того, Ейнштейн вивів формулу, з якої виходить, що зовнішній фотоелект ефект можливий лише при $h\nu > A_0$. З цієї формули обчислюється найменша частота світла, при якій можливий фотоелект ефект (червона границя) (другий закон).

Також обґрунтовується, що число фотоелектронів, які щосекунди вилітають з металу, пропорційне інтенсивності світла (третій закон).

Квантова природа світла підтверджується безінерційністю фотоелекту [19].

2.6.1.3. Моделі атома. Модель і постулати Бора

Наприкінці XIX – початку XX ст. було запропоновано кілька моделей атома, найбільше визнання одержала ядерна (планетарна) *модель Резерфорда* (1912 р.).

Модель Резерфорда добре узгоджувалась з експериментальними результатами і була важливим досягненням. Але досить швидко вона зіткнулась з рядом протиріч, які не могли бути розв'язані на основі класичних уявлень.

У 1913 р. молодший послідовник Резерфорда *Н. Бор* виступив зі своєю уточненою планетарною моделлю, в основі якої лежали наступні постулати [19–21].

Постулат 1: про існування стаціонарних станів.

В атомі існують певні стаціонарні стани, що не змінюються без зовнішніх збурень. Стаціонарні стани відповідають стаціонарним орбітам, по яким рухаються електрони, не випромінюючи електромагнітних хвиль.

Постулат 2: Правило квантування

У стаціонарному стані атома електрон, рухаючись по коловій орбіті, повинен мати дискретні квантовані значення моменту імпульсу:

$$L_n = mvr = nh, n=1, 2, 3, \dots,$$

де m – маса електрона; v – швидкість; h – стала Дірака; r – радіус орбіти.

Постулат 3: Правило частот

При переході атома з одного стаціонарного стану в інше випромінюється або поглинається один квант енергії

$$E_0 = h\nu,$$

де h – стала Планка; ν – квантова частота.

Чим далі від ядра знаходиться електрон, тим більшою енергією він володіє. Це означає, що при переході електрона з більш високої на нижчу орбіту відбувається випромінювання енергії, при переході на більш високу орбіту – поглинання (рис. 2.1).

Всі ці постулати були геніальною гіпотезою, але на той час ще не мали чіткого наукового обґрунтування.

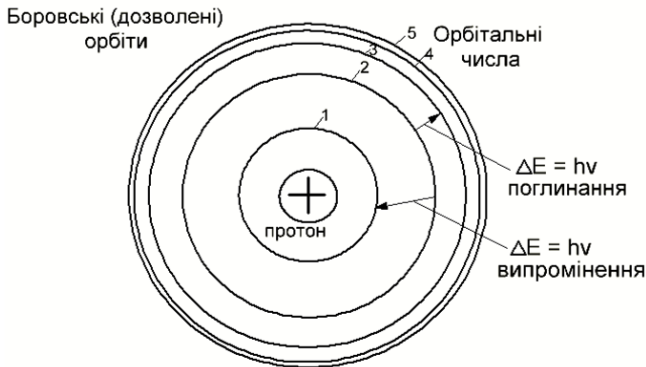


Рис. 2.1. Модель атома Бора

2.6.1.4. Подвійна корпускулярно-хвильова природа випромінювання і частинок. Хвилі де Бройля

У 1924 р. французький фізик **Луї де Бройль** висловив гіпотезу, що подвійна корпускулярно-хвильова природа світла може бути розповсюджена і на частинки речовини, зокрема, електрон. Де Бройль стверджу-

вав, що подвійна природа носить універсальний характер і вивів формулу для визначення довжини хвилі будь якої частинки (фотона, електрона, атома, молекули) в залежності від її маси m і швидкості v . Надалі ця гіпотеза набула експериментального підтвердження [20, 22–24].

Хвилі де Бройля – специфічні “електронні” хвилі, які не мають відношення до електромагнітних (рис. 2.2).

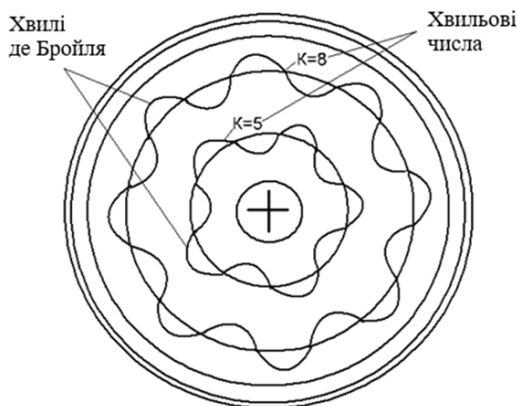


Рис. 2.2. Хвилі де Бройля

Слід підкреслити, що хвильові властивості частинок справедливі і для макротіл, але довжина хвилі де Бройля буде настільки малою (порядку одиниць 10^{-27} м, що не може бути виявлена.

Відкриття де Бройля (Нобелівська премія) зіграло величезну роль у розвитку квантової фізики. Воно пояснило, зокрема, поняття “дозволених орбіт” в моделі атома Бора, **дискретність** як принципову рису мікросвіту, а також всі постулати Бора.

2.6.1.5. Хвильова функція Шредінгера

Для опису хвиль де Бройля в квантовій механіці **Ервіном Шредінгером** була введена спеціальна хвильова **пси-функція** у трьох координатах і часі – X, Y, Z, t . Суть цієї функції (точніше, квадрату її модуля) – ймовірність знаходження мікрочастинки в тій чи іншій точці простору-часу [19, 23, 24].

Хвильова функція є основною характеристикою стану мікросвіту, її значення можна порівняти зі значенням другого закону Ньютона в класичній механіці. За допомогою цього рівняння можна доказати один з фундаментальних законів квантової фізики, що енергія і імпульс електрона в атомі, молекулі, кристалі не може мати будь-яке значення, а лише певне дискретне. Іншими словами, енергія і імпульс електрона можуть знаходитись лише у визначених (дозволених) енергетичних станах.

2.6.1.6. Співвідношення невизначеностей П. Гайзенберга

Подвійна квантово-хвильова природа частинок, що розглядаються у мікросвіті, є причиною того, що *неможливо одночасно точно вимірювати координати частинки і її швидкість*. Це знайшло своє відображення у так званому принципі *співвідношень невизначеності* – одному з фундаментальних законів квантової механіки, який одержав ім'я його автора *Гайзенберга* [8, 9].

Цей принцип є справедливим для будь яких процесів, але в *макросвіті* він настільки незначний, що може не враховуватись.

Принцип невизначеності означає, що чим точніше знайдено один параметр, тим з меншою точністю – другий, що в мікросвіті діють *ймовірнісні* (статистичні) закони і немає місця *детермінізму*.

Співвідношення невизначеностей є принциповим обмеженням точності у квантовій механіці і не може бути скасоване або зменшено з подальшим розвитком квантової фізики, як не може бути змінена стала Планка.

2.6.1.7. Принцип Паулі

Для атомів з одним електроном було показано, що електрон завжди намагається перейти у незбуджений стан, в якому він буде володіти мінімальною енергією. Це є дійсним і для багатоелектронних атомів, де, вважалося би, всі електрони повинні зібратись на нижньому рівні.

Принцип *Паулі* (1925 р.) забороняє скупчення електронів на самому нижньому рівні. Він говорить, що “у будь-якій системі у стаціонарному стані, що визначається чотирма квантовими числами: головним n , орбітальним l , магнітним m , спіновим m_s , не може бути більше одного електрона”:

$$Z(n, l, m, m_s) = 0 \text{ або } 1.$$

Принцип Паулі свідчить про те, що електрони в атомі можуть займати певну сукупність станів.

Принцип Паулі зіграв визначну роль у розвитку сучасної атомної і квантової фізики, а також обґрунтуванні Періодичної системи елементів Менделєєва [19, 20, 24].

2.6.1.8. Принцип відповідності Бора

За класичною фізикою, *час* є абсолютною категорією, а виявилось, що відносною; за класичною фізикою *швидкість* може зростати до будь якого значення, а виявилось, що вона обмежена швидкістю світла; за класичною фізикою *дія* може бути скільки завгодно малою, а виявилось, що не менше кванта дії h і змінюватись може тільки дискретно з кроком h ; за класичною фізикою, *хвиля є хвилею, частинка – частинкою*, виявилось, що *ні*, в природі існує *корпускулярно-хвильовий дуалізм*.

Все ставить на свої місця сформульований у 1922 р. Н. Бором *принцип відповідності*: 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) [19–21].

Дійсно, при швидкостях, значно менших c , формули спеціальної теорії відносності переходять у формули класичної механіки Ньютона; при довжині хвилі світла нехтовно малими у порівнянні з довжинами, які вимірюються, висновки хвильової оптики переходять в результати геометричної оптики і т.д.

Поміж квантовою механікою і класичною граничний перехід пов'язаний з можливістю знехтувати скінченністю величини h і вважати $h=0$. Тоді не працює і такий фундаментальний принцип квантової механіки, як співвідношення невизначеностей.

В атомі при зростанні квантового числа n відбувається зближення енергетичних рівней (орбіт). При великих значеннях n орбіти зближуються настільки, що стають майже неперервними, тобто починають працювати закони класичної фізики.

Бор не обмежився принципом відповідності і в подальшому розвинув його в *принцип додатковості (доповнення)*. Ось його слова:

“Квантова і класична фізика оперують, здається, несумісними поняттями: хвиля-частинка, переривистий-неперервний, причинність-випадковість. Не треба шукати шляхів позбавлення протилежностей. У рівноправ’ї несумісних рис *відсутній конфлікт з природою*. Треба визнати законність їх співіснування. Вони не борються, а співіснують, *доповнюючи* одна одну”.

Підсумуємо сказане вище:

1) Квантова фізика – фізика мікросвіту.

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

3) Явище квантування розповсюджується не тільки на випромінення, 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).

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

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

6) 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).

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

9) В мікросвіті можливі явища, які не можуть бути пояснені з точки зору класичної фізики, про які буде сказано нижче. Ці явища лежать в основі ряду *макроскопічних квантових ефектів*, які знайшли використання в метрології.

2.6.2. Квантові явища і ефекти

Принцип квантового обмеження

Коли рух електрона відбувається в обмеженій області, його енергія має строго визначені, дискретні значення. Спектр енергій, як кажуть, *квантується*. Обмеження руху електронів (дірок) в низьковимірній структурі, що приводить (в силу їх квантово-хвильової природи) до дискретності енергій дозволених станів, називається *квантовим обмеженням*.

У твердих тілах квантове обмеження може бути реалізовано в трьох просторових напрямках.

А) Структури з двовимірним електронним газом (квантові ями).

Одним із прикладів таких структур є тонкі плівки. У такій структурі один з напрямків (z) дуже малий, тому в цьому напрямку утворюється так звана *потенційна яма*. В інших двох напрямках електрони можуть вільно рухатися. Товщина плівки повинна складати десятки нанометрів, що відповідає декільком міжатомним відстаням.

В) Структури з одновимірним електронним газом (квантові нитки) – це квантові структури, де рух носіїв обмежено не одним, а двома напрямками (y і z). При цьому носії можуть вільно переміщатися тільки в одному напрямку, уздовж нитки (осі абсцис). У поперечному перерізі (площині y - z) енергія квантується і приймає дискретні значення, описується двома квантовими числами, n і m).

С) Структури з нульовимірним електронним газом (квантові точки). У такій структурі рух носіїв обмежено у всіх трьох напрямках (x , y і z). Такі структури особливо цікаві тим, що їх властивості схожі з властивостями дискретного атома, тому їх іноді називають штучними атомами. Тут енергетичний спектр чисто дискретний. Як і в атомі, він описується трьома дискретними квантовими числами.

Як було сказано вище, в мікросвіті можливі явища, які не можуть бути пояснені з точки зору класичної фізики: квантування і квантові переходи, тунелювання електронів через потенційний бар'єр, поєднання електронів в “куперівські” пари, надпровідність і надплинність, створення “колективів” електронів, поєднаних єдиною хвильовою функцією тощо. Ці явища лежать в основі ряду макроскопічних квантових ефектів.

Квантування та **квантові переходи** вже розглянуто при знайомстві з квантовою формулою Планка, моделлю атома Бора, роботами де Бройля і Ейнштейна.

Ще одними сугубо квантовим явищем є **тунелювання** електронів через діелектрик [19–21], тобто потенційний бар'єр, енергетична висота якого вище енергії електрона. Згідно класичним уявленням, хвиля відіб'ється від бар'єру і залишиться в потенційній ямі. Урахування квантових явищ показує, що при деяких умовах можливе “тунелювання” електрона через потенційний бар'єр. Хвиля, що попадає на бар'єр, відбивається від нього, але частина її може проникнути через нього (рис. 2.3).

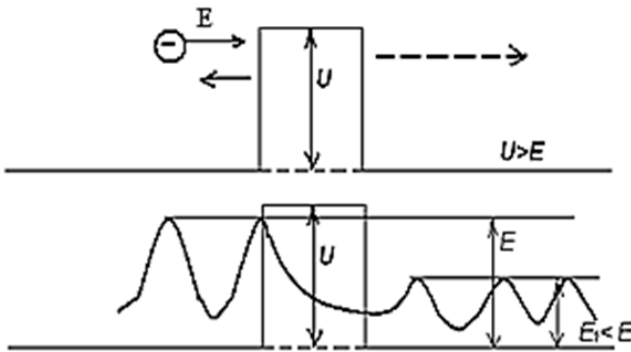


Рис.2.3. Тунелювання електронів

Для опису тунельного ефекту введено поняття **прозорості** потенціального бар'єру, яка характеризується коефіцієнтом $D = E_{\text{пр}} / E_{\text{пад}}$.

Коефіцієнт D залежить від висоти і лінійних розмірів бар'єру, а також невизначеності енергії електрона. Його слід розглядати як ймовірність проходження хвилі через потенційний бар'єр. Для того, щоб частинка проникла через бар'єр, необхідно, щоб “гайзенбергівська” невизначеність її енергії була близькою до різниці між висотою бар'єру і енергією частинки.

Ефект має місце при сумірності розмірів бар'єру з атомними розмірами ($10^{-9} - 10^{-10}$ м). У макросвіті прозорість складає нехтовно мале значення, тобто ефект відсутній.

Надпровідність [19, 24–26] – суцього квантове явище, яке широко застосовується в квантовій метрології і лежить в основі **ефекту Джозефсона** [25, 28].

У 1911 р. було встановлено, що при температурі $T_{кр} \approx 4,2$ К електричний опір очищеної ртуті різко падає до нуля (Х. Камерлінг – Онес). Електричний струм, індукований у ртутному провіднику, зберігається при $T < 4,2$ К незмінним довгий час. Це явище було названо **надпровідністю**. Температура $T_{кр}$, при якій речовина переходить в надпровідний стан, називається **критичною температурою переходу**.

Для стану надпровідності притаманні дві фундаментальні властивості: **відсутність електричного опору і виштовхування магнітного поля з надпровідного середовища (ефект Мейснера)**.

Надпровідний стан провідника можна зруйнувати накладенням достатньо сильного магнітного поля. При будь-якій температурі $T < T_{кр}$ існують деякі мінімальні значення $H_{кр}$ напруженості магнітного поля, якого достатньо для зруйнування надпровідного стану. Значення $H_{кр}$ називають **критичною напруженістю**.

Як вже було сказано, при $T < T_{кр}$ надпровідник, який поміщено в магнітне поле, **виштовхує** з себе магнітний потік. Це явище називається **ефектом Мейснера**.

На рис. 2.15 а) зображено потік магнітної індукції B , який пронизує провідник в звичайному стані. На рис. 2.4 б) магнітний потік виштовхується з провідника, який знаходиться в надпровідному стані. При цьому провідник веде себе як ідеальний діамagnetик з магнітною сприйнятливістю $H_m = -1$.

Сучасна теорія надпровідності розроблена вченими Бардінім, Купером, Шліффером (за першими літерами їх прізвищ – **теорія БКШ**).

Для розуміння надпровідності розглянемо таке квантове явище, як **надплинність**, коли надплинний рідкий гелій (ізоп гелію ^4He) може протікати через дрібні капіляри і будь-які отвори абсолютно вільно, без тертя. Це пояснюється зчепленням частинок єдиною хвильовою функцією, утворенням великих “колективів” пов’язаних частинок, які здатні рухатись практично без опору. **Надпровідність** за своєю фізичною природою близька до надплинності, перш за все, тим, що це теж **колективне явище** (офіційна назва) з єдиною хвильовою функцією, здатне рухатись без опору.

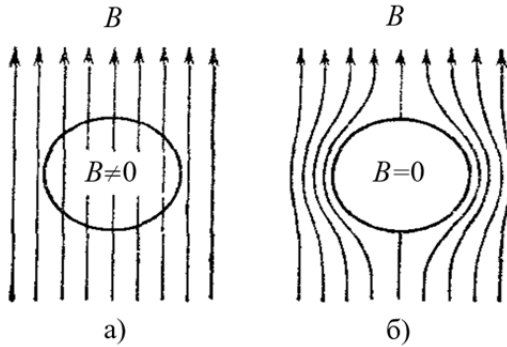


Рисунок 2.4. Ілюстрація ефекту Мейснера

В 1950 р. була висловлена ідея про те, що при деяких умовах взаємодія електронів з фононами може бути причиною переходу в надпровідний стан. Справа в тім, що розсіювання електронів на фононах призводить до виникнення обмінної взаємодії між самими електронами, яка має специфічну квантово-механічну природу і виявляється в їх *взаємному тяжінні*. Спочатку в певних умовах, за участю фононів, має місце поєднання електронів у так звані “*куперівські пари*”.

Тут необхідно згадати про *спін*. Спін – одна з квантових характеристик будь-якої частинки, зокрема електрона, який характеризує його обертання навколо своєї осі. Спін може приймати цілі або напівцілі значення. Існує дві групи частинок: *Бозе-частинки (бозони, з цілим спіном)* і *Фермі-частинки (ферміони, з напівцілим спіном)*. До останніх належать електрон і протон. Для бозонів природно виконання умов, необхідних для руху без опору. А ферміони, навпаки: у відповідності до принципу Паулі, відштовхуються один від одного. Але, об’єднавшись у пару, одержують цілочисельний спін і докорінно змінюють свої властивості. Вони стають Бозе-частинками, об’єднаними єдиною функцією. При T нижче $T_{кр}$ *всі електрони* поєднуються єдиною хвильовою функцією, стають єдиним “*колективом*”, який *не може віддавати енергію малими порціями*, тобто виникають умови надпровідності.

При цьому зіткнення з вузлами решітки не змінюють енергію електронів провідності, і метал веде себе як ідеальний надпровідник з нульовим

питомим опором. Для того щоб порушити зв'язок будь-якого електрона з іншими електронами колективу, необхідно затратити енергію, відповідну середній енергії теплових коливань вузлів решітки при температурі переходу $T_{кр}$. Тому при $T > T_{кр}$ надпровідний стан існувати не може.

Ефекти Зесмана і Штарка – розщеплення ліній атомних спектрів в магнітному полі (1896 р.) і електричному полі (1919 р.), пояснюють квантові резонансні явища в магнітах (ЯМР і інші) [19, 24].

2.6.3. Використання квантових явищ у метрології

Квантова метрологія, в широкому сенсі цього терміну, є використання явищ мікросвіту для дослідження макросвіту, у більш вузькому – застосування відомих і вивчених квантових явищ для вимірювання параметрів макрооб'єктів і відтворення одиниць величин [24–26].

Використання квантових явищ нерозривно пов'язане з використанням **фундаментальних фізичних сталей** (ФФС) як істинних еталонів природи. ФФС – незалежні фізичні сталі, що є, як правило, характерними коефіцієнтами фундаментальних фізичних теорій [6, 22, 24].

Прагнення виразити одиниці вимірювань через ФФС, як істинні природні інваріанти, сформувався не зараз. Ще в ХІХ столітті Дж. К. Максвел в своєму виступі перед Британською асоціацією науки (1870 р.) казав: "... Якщо ми бажаємо отримати еталони довжини, часу та маси, які будуть абсолютно незмінними, ми маємо шукати їх не в розмірах, або русі, або масі нашої планети, а в довжині хвилі, періоді коливань, абсолютній масі стійких, незмінних і цілком однакових молекул".

Це пророцтво Максвела збулося: квантові методи вимірювань склали **основу Нової SI 2019 року**, а їх впровадження в метрологічну практику дозволило підняти точність відтворення ряду одиниць **на два-три порядки, або одержати інші якісні властивості і переваги**.

2.6.4. Макроскопічні квантові ефекти

Як вже відзначалось, стала Планка перекидає місток між мікро- і макросвітом завдяки співвідношенню, що пов'язує енергію і частоту випромінювання. Названі вище **мікроскопічні** квантові явища є під-

грунтям, на якому були відкриті **макроскопічні** квантові ефекти, які стали основою методології квантової метрології (див. табл. 2.8).

Так, мікроскопічний ефект **квантового переходу** в атомах цезію-133, що супроводжується випромінюванням або поглинанням кванту електромагнітної енергії, став основою **макроскопічного ефекту** – стабілізації частоти цезієвого репера і створення первинного еталона часу-частоти. Аналогічно, на основі цього ефекту були створені інші квантові генератори радіо- і оптичного діапазонів, еталони часу і довжини.

Інші мікроскопічні квантові явища – поєднання електронів у кuperівські пари, **тунелювання** електронів через потенційний бар'єр, **надпровідність** – привели до відкриття макроскопічного квантового ефекту **Джозефсона** (і створення на його основі еталонів електричної напруги) [28].

На явищі **кулонівської блокади** і тунелювання поодиноких електронів ґрунтується макроскопічний ефект “**одноелектронного тунелювання**” [25, 32], який використовується для відтворення одиниці сили струму (на відміну від двоелектронного тунелювання, яке має місце в ефекті Джозефсона).

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** [9, 13].

Використання цього ефекту дозволило отримати реперні значення електричного опору і створити квантовий еталон ома [24, 29].

Ефект Зесмана – розщеплення ліній атомних спектрів в магнітному полі – лежить в основі квантової магнітометрії. Найбільше використання знайшли резонансні квантові методи, суть яких полягає у вимірюванні частоти квантів електромагнітної енергії при переходах мікрочастинок з одного зееманівського підрівня на інший.

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 [30, 31, 25]. Існують також **електронний і атомний магнітні резонанси**, які теж використовуються в метрології.

До макроскопічних квантових ефектів відноситься також **фотоелектричний ефект (фотоелект)**, який полягає у “**вириванні**” електронів у твердих і рідких тіл під дією світла, тобто відбувається перетворення оптичного (світлового) випромінювання в електричний струм. Фотоелектр знайшов використання в оптичних вимірюваннях [18, 19].

Існують багато інших квантових методів і ефектів, але в даному підручнику розглядаються лише ті, які знайшли широке використання в метрології.

Відтворення основних одиниць ФФС у SI-2019 відповідно до їх нових визначень стало, на цей час, одним з найважливіших використань квантових технологій. Саме ці технології були рекомендовані МКМВ і його робочими органами з видів вимірювання в практичних рекомендаціях (Mise en pratique – MeP) з реалізації одиниць ФВ.

Наведемо деякі відомості з MeP щодо реалізації основних одиниць (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

Реалізація основних одиниць в Новій SI

Основна одиниця	Стала, до якої простежується одиниця	Первинний (референтний) метод відтворення	Основна апаратура
1	2	3	4
Секунда	ν_{cs} – частота квантового переходу в атомі цезія-133	Квантове генерування – перехід в атомі цезія-133	Цезієвий репер, водневий генератор
Метр	c – швидкість світла	Генерування монохроматичного когерентного світлового випромінювання та вимірювання його частоти: $L = c/f_n$	Високо-стабільний лазер і вимірювач його частоти
Ампер	e – елементарний заряд	1. Закон Ома і квантові ефекти Джозефсона і Холла: $I = U_J/R_H$, де U_J – напруга Джозефсона; R_H – Холлівський опір. 2. SET–тунелювання, кулонівська блокада	1. Міри, простежувані до сталих Джозефсона і Клітцинга, струмовий компаратор 2. SET-насос

Продовження табл. 2.8

1	2	3	4
Кілограм	h – стала Планка	1. Порівняння $P_{\text{ел}} = P_{\text{мех}}$, вимірювання $P_{\text{ел}}$ через квантові ефекти Джоузефсона і Холла 2. Метод “рентгенівської густини кристалу”	1. Ват-ваги; квантові електр міри, 2. Рентгенівська установка
Кельвін	k – стала Больцмана	Методи первинної термометрії	
Кандела	$k(\lambda_{555})$ – спектральна сила світла частотою 540×10^{12} Гц	1. Явище фотоефекту (фотометрія) 2. Радіометрія	1. Приймач-фото-метр; трап-детектор 2. Криогенний радіометр
Моль	N_A – стала Авогадро	Еталон не створюється	–

2.7. Висновки до розділу 2

1. Розвиток науки і технологій ХХІ століття привели до народження нової метрології, основними вимогами до якої стали підвищення точності відтворення одиниць, стабільність їх зберігання, доступність найвищої точності для практичної метрології. Таким вимогам відповідає метрологія і вимірювальна техніка, яка ґрунтується на квантових явищах і ефектах.

2. Основним напрямком реалізації нової метрології стала прив’язка одиниць вимірювання до фундаментальних фізичних сталих, що, в свою чергу, привело до використання квантових ефектів і стабільних фізичних явищ для відтворення одиниць.

3. Науковою основою нової – **квантової метрології** є **квантова механіка** – розділ теоретичної фізики, що вивчає закони руху частинок в області мікросвіту.

4. Квантова механіка будується на таких засадах:

- 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**.

- 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 такі особливості мікросвіту як *дискретність* (енергії, частоти, моменту, орбіт, спектра тощо) і *квантову обмеженість*.

- 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, розщеплення спектрів*. Ці явища лежать в основі ряду *макроскопічних квантових ефектів*, які знайшли використання в інформаційно-вимірювальній техніці.

2.8. Контрольні питання до розділу 2

1. Що викликало необхідність реформи SI і створення New SI?
2. Назвіть основні недоліки визначення кілограма, яке діяло до 2019 р.?
3. До яких змін в методології відтворення електричних одиниць привело перевизначення ампера?
4. Які вимоги сформульовані МКМВ для офіційного перевизначення 4-х основних одиниць?

5. Який позитивний ефект очікується від перевизначення одиниць в метрології і науці загалом?
6. У чому полягає суть New SI і яка її відмінність від SI?
7. Чи змінились розміри основних одиниць у New SI в порівнянні з SI, яка діяла до 2019 р.?
8. Які сталі складають основу New SI?
9. Поясніть модель атома Бора і його постулати.
10. Яка фізична суть сталої Планка?
11. Назвіть фізичні ефекти, які використовуються у квантовій метрології.
12. Поясніть суть квантово-механічної формули.
13. Поясніть принцип невизначеності Гайзенберга
14. В чому полягає принцип відповідності Бора?

3. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ЕТАЛОНІВ

3.1. Нормативні документи

Крім Закону “Про метрологію і метрологічну діяльність” [6] основним нормативним міжнародним документом, який регулює питання створення, визнання і експлуатації еталонів, є стандарт OIML D 8:2004 Measurement standards. Choice, recognition, use, conservation and documentation [33]. На його основі в Україні видано ДСТУ OIML D 8:2008, Еталони. Вибір, визнання, застосування, зберігання і документація [34], який є ідентичним перекладом вищенаведеного стандарту OIML. Крім того, є діючим в Україні ДСТУ 3231:2007 Метрологія. Еталони одиниць вимірювань державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування [35].

Ці нормативні документи регламентують:

- принципи вибору еталона для вирішення тієї чи іншої метрологічної задачі;
- умови визнання еталона, тобто офіційного підтвердження національним органом з метрології відповідності метрологічних і технічних характеристик еталона встановленим вимогам;
 - метрологічні, технічні і економічні вимоги до еталона;
 - положення щодо застосування еталона (вимоги до кваліфікації персоналу, умов використання, процедур калібрування, порядку застосування, міжкалібрувального інтервалу);
 - питання зберігання протоколів калібрування, застосування ремонту, модернізації, повторного калібрування;
 - перелік необхідної документації до еталона і її зміст;
 - правила і умови зберігання еталонів.

3.2. Функції еталона

Еталон (standard) – *реалізація* визначення даної величини із встановленим значенням величини та пов’язаною з ним невизначеністю вимірювання, що використовується як основа для порівняння [6, 7].

В [8] наводиться наступне визначення поняття “еталон” – ЗВТ, що забезпечує **відтворення** та/або **зберігання** одиниці вимірювання одного чи декількох значень, а також **передачу розміру** цієї одиниці іншим засобом вимірювальної техніки.

В цьому визначенні позначені основні функції еталону:

- відтворення одиниці вимірювання;
- зберігання одиниці вимірювання;
- передача розміру одиниці.

Відтворення одиниці (фізичної величини) (reproduction of quantity unit) – **встановлення високостабільного еталона**, який може бути вимірювальною системою, матеріальною мірою або стандартним зразком [8].

Зберігання еталона – сукупність операцій, необхідних для збереження метрологічних характеристик еталона у встановлених границях [7].

Незмінність у часі відтвореного розміру одиниці – надзвичайно важлива вимога до еталона. У різних еталонах ця вимога забезпечується по-різному. Є еталони, в яких можливо перед кожним застосуванням за призначенням провести його калібрування (тобто відтворення одиниці), а є такі еталони, де треба гарантувати довготривалу незмінність (стабільність), оскільки процедура відтворення може бути виконана через значний інтервал часу. Для таких еталонів створюються спеціальні умови зберігання, іноді дуже жорсткі, а також методи і засоби контролю їх стабільності.

Зберігання еталона зазвичай включає періодичну верифікацію встановлених метрологічних характеристик, забезпечення належних умов зберігання та дотримання встановлених правил застосування. Для здійснення робіт по зберіганню первинних еталонів встановлюють спеціальну категорію посадових осіб – вчених зберігачів еталонів, що призначаються з числа провідних у даній галузі фахівців-метрологів.

При створенні еталона обов’язково розглядаються питання (методи і засоби) **передавання розмірів** відтворених ними **одиниць** підпорядкованим засобам вимірювання, які проградуйовані в цих одиницях.

Термін “передавання розміру одиниці” зустрічається тільки в застарілому, хоча й діючому в Україні стандарті ДСТУ 2681-94 [8]: **передавання розміру одиниці** (unit size transfer) – зведення одиниці ФВ, яка відтворюється або зберігається ЗВТ, що повіряється, до розміру одиниці, що відтворюється або зберігається еталоном, яке здійснюється при їх звіренні (повірці)”.

На цей час, згідно з Законом про метрологію та метрологічну діяльність [6], передача одиниці величини здійснюється за допомогою **калібрування**.

Калібрування (calibration) – сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу [6, 7].

Для цього встановлюється так звана **ієрархія калібрування** (calibration hierarchy) – послідовність калібрування, починаючи від основи для порівняння і закінчуючи вимірювальною системою, причому в цій послідовності результат кожного калібрування залежить від результату попереднього калібрування [7].

Це дає змогу встановити **метрологічну простежуваність** – власність результату вимірювань, яка полягає в тому, що цей результат може бути пов'язаний з еталоном через задокументований нерозривний ланцюг калібрувань, кожне з яких робить свій внесок у невизначеність вимірювання [6].

3.3. Види (класифікація) еталонів

Класифікація еталонів наведена на рис. 3.1.

За сферою дії розділяють міжнародні, національні і відомчі еталони.

Міжнародний еталон (international measurement standard) – визнаний усіма державами, які підписали міжнародну угоду та призначений для всього світу [7].

Національний еталон (national measurement standard) – еталон, визнаний національними органами влади для використання у державній або господарській діяльності як основа для приписування значень величини іншим еталонам для такого роду величин [7].

Статус національних еталонів надається:

- **первинним еталонам** (у тому числі **державним еталонам** і еталонам, що є власністю підприємств та організацій);

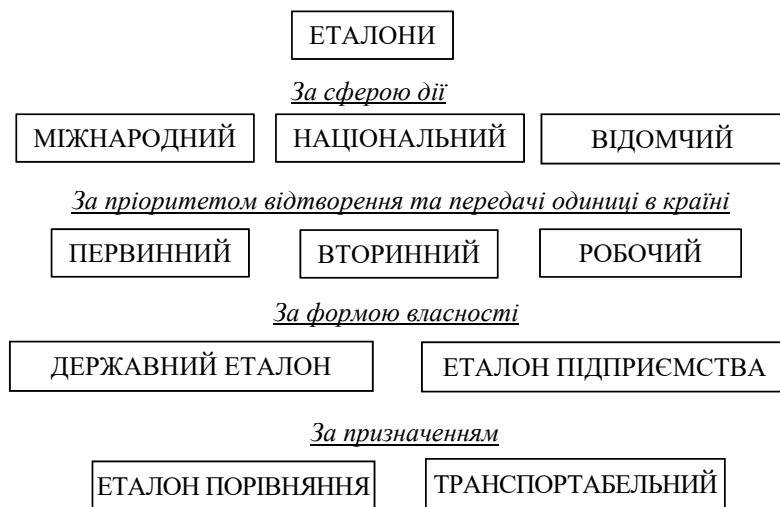


Рис. 3.1. Класифікація еталонів

- **вторинним еталонам** (у тому числі державним еталонам і еталонам, що є власністю підприємств та організацій), які мають найвищі метрологічні властивості серед еталонів даної одиниці, що є в державі.

Відомчий еталон – **вихідний еталон** для відомства (міністерства).

Вихідний еталон (reference measurement standard) – еталон, який має найвищі метрологічні властивості серед еталонів даної одиниці, що є у державі, на підприємстві, в установі чи організації [6].

За формою власності еталони розділяють на державний еталон та еталон підприємства.

Державний еталон – первинний або вторинний еталон, що перебуває у державній власності [6].

Еталон підприємства – первинний або вторинний еталон, що перебуває у приватній власності.

За пріоритетом відтворення та зберігання одиниці розділяють первинні, вторинні та робочі еталони.

Первинний еталон (primary measurement standard) – еталон, заснований на використанні первинної референтної методики вимірювань [7].

Вторинний еталон (secondary measurement standard) – еталон, який калібрується по первинному еталону для величини того ж роду [7]. Він створюється для зменшення зносу первинного еталону.

Робочий еталон (working measurement standard) – еталон, який використовують для повсякденного калібрування або перевірки засобів вимірювань або вимірювальних систем [7].

За призначенням еталони розділяють на еталон порівняння та транспортбельний.

Еталон порівняння (transfer measurement standard) – еталон, який використовується як засіб **звірення** еталонів [7].

Звірення (comparisons) – порівняння ЗВТ з ЗВТ того ж виду (міри з мірою, вимірювального приладу з вимірювальним приладом) для визначення систематичної похибки [8].

Транспортбельний еталон (travelling measurement standard) – еталон, іноді особливої конструкції, призначений для транспортування з одного місця в інше [7].

Зауважимо, що вимога відтворення одиниці є обов'язковою тільки для первинного еталона. Інші еталони, у залежності від різних обставин, можуть не відтворювати розмір одиниці, але вимога зберігання і передавання залишається необхідною для всіх категорій еталонів.

3.4. Особливості еталонів у порівнянні з іншими засобами вимірювальної техніки

Особливостями еталонів є:

- наявність процедури визнання еталона, яка передбачає виконання ряду умов, особливо щодо простежуваності, калібрування, первинності методик, достовірності метрологічних характеристик;
- регламентація правил і умов зберігання і застосування еталона;
- обов'язковість “наукового зберігання” первинних еталонів, під яким розуміють сукупність операцій, що необхідні для підтримання метрологічних характеристик еталона в установлених границях. Зберігання еталонів здійснюється під наглядом ученого зберігача, який несе відповідальність за додержанням умов зберігання і використання державного еталона та його вдосконалення;

- необхідність періодичного звірення з еталонами інших країн для оцінки еквівалентності;
- регламентація необхідної документації до еталона, її своєчасна актуалізація.

Еталонна база створюється та вдосконалюється згідно з державними науково-технічними програмами, які розробляються ЦОВМ України з метою забезпечення потреб науки, економіки і оборони.

На еталони не розповсюджуються ряд ДСТУ та інших нормативних документів щодо нормування метрологічних характеристик деякі вимоги до конструкторських, технологічних, експлуатаційних документів тощо. Розглянемо особливості нормування метрологічних характеристик еталонів, зокрема, показників їх точності.

3.5. Вибір еталона

У разі вибору еталону (ЗВТ такого, як, наприклад, вимірювальний прилад, матеріальна міра або стандартний зразок) для застосування його як вихідного або робочого еталона, враховують метрологічні, технічні та економічні вимоги.

3.5.1. Метрологічні вимоги

Метрологічні вимоги стосуються таких метрологічних характеристик еталона і його допоміжного устаткування:

- a) величина та одиниця (-ці);
- b) номінальне (-ні) значення або діапазон вимірювання величини, для якої застосовують еталон;
- c) дійсне значення величини, яке відтворюється еталонном (визначене в процесі його дослідження або калібрування) або систематична похибка еталона;
- d) розширена невизначеність вимірювання, встановлена в процесі дослідження або калібрування еталона, що відповідає імовірності охоплення приблизно 95 % (точно 95,45 %) і коефіцієнтові охоплення k , або сумарна стандартна невизначеність;

- е) міжкалібрувальний інтервал;
- ф) стабільність відповідної величини, яка відтворюється еталоном протягом міжкалібрувального інтервалу (за необхідності);
- г) інформація щодо методів і засобів калібрування (за необхідності);
- h) нормальні і робочі умови навколишнього середовища, відповідно;
- і) інші важливі метрологічні вимоги (лінійність; гістерезис; чутливість, збіжність, характеристики динамічних метрологічних властивостей тощо) – за необхідності.

Систематичну похибку еталона визначають звіренням його з еталоном вищого метрологічного рівня калібруванням. Якщо систематична похибка (зокрема нелінійність) відома і задокументована, то вводять поправку на значення цієї похибки. Отже, або має бути зроблена поправка на значення систематичної похибки, або похибка має бути врахована під час оцінювання невизначеності.

Невизначеність вимірювання під час калібрування еталона є основним параметром (визначеним разом з дійсним (-ми) значенням (-ми) величини, відтвореної еталоном), необхідним для установаження невизначеності вимірювання під час калібрування ЗВТ. Складники невизначеності, які впливають на результати калібрування, повинні бути встановлені і визначені для обчислення невизначеності вимірювання. Оцінювання невизначеності вимірювання проводять відповідно до GUM [36] (див. також розділ 5).

Інформація щодо методів і засобів калібрування стосується:

- методів, які застосовують під час калібрування еталона, і методів, які застосовують під час передавання значення величини від еталона до засобу вимірювання;
- методу, який застосовують у разі оцінювання результатів вимірювання, одержаних під час застосування еталона;
- визнаного ланцюга простежуваності для еталона.

3.5.2. Технічні вимоги

Технічні вимоги головним чином поширюються на:

- а) технічну придатність еталона для застосування за призначеністю;
- б) простоту застосування і зберігання еталона та його технічну надійність;

с) простоту транспортування, встановлювання, під'єднання, контролювання, калібрування і технічного обслуговування еталона та його допоміжного устаткування;

д) надійність захисту від пошкодження, засоби захисту від погіршення навколишнього середовища, від несанкційованого втручання тощо протягом застосування і зберігання еталона;

е) спеціальне устаткування (пристрої), необхідні під час застосування і зберігання еталона (енергопостачання, забезпечення стабільності робочих умов).

3.5.3. Економічні вимоги

Економічні вимоги головним чином базуються на:

а) вартості еталона, зокрема його допоміжному устаткуванню;

б) вартості застосування і зберігання еталона;

с) вартості калібрування самого еталону, та всіх пристроїв, що входять до його складу;

д) витратах, пов'язаних з можливим ремонтом і строком служби еталона та його допоміжного устаткування;

е) витратах, пов'язаних з лабораторним приміщенням, де еталон зберігають і застосовують, кількістю персоналу, транспортуванням.

3.6. Визнання еталона

Національний (законодавчий) орган з метрології (залежно від національного законодавства) встановлює такі умови для визнання еталона:

а) наявність документально зареєстрованої простежуваності значення величини (величин) еталона;

б) еталон має бути ідентифіковано, а його метрологічні і технічні характеристики документально оформлено;

с) наявність умов для тривалої роботи еталона і документально оформлених правил його застосування і зберігання;

д) невизначеність вимірювання за результатами калібрування еталона, що відповідає вимогам його застосування за призначеністю.

Додаткову достовірність еталону додають міжлабораторні звірення (національні або міжнародні). Простежуваність значення величини (величин) еталона забезпечують його калібруванням та оформленням свідоцтва про калібрування. Калібрування еталона проводить Національний метрологічний інститут або калібрувальна лабораторія, яка може підтвердити відповідну компетенцію та простежувані вимірювальні можливості (наприклад, акредитацією).

3.7. Застосування еталона

Правила застосування еталона сприяють підвищенню ефективності калібрування ЗВТ, тривалості строку застосування еталона, більшої економії енергії та матеріалів тощо.

Застосування еталона базується на таких загальних положеннях:

- a) роботи на еталоні виконує лише кваліфікований персонал, одну особу призначають відповідальною за еталон;
- с) еталон застосовують лише в місцях, де умови експлуатації і навколишнього середовища повністю відповідають вимогам;
- d) калібрування еталона виконують лише за затвердженими і визначеними процедурами і методами;
- e) чітко визначають порядок застосування еталона;
- f) еталон регулярно калібрують із міжкалібрувальним інтервалом, визначеним відповідно до його характеристик;
- g) треба зберігати протоколи калібрування, застосування, ремонту, модернізації і повторного калібрування еталона.

3.8. Зберігання еталона

Основні правила зберігання еталона:

- a) регулярно проводять технічне обслуговування еталона згідно із затвердженими правилами, враховуючи настанови виробника;
- с) калібрування еталона і його допоміжного устаткування проводять з визначеною періодичністю залежно від частоти і умов його застосування;
- d) визначають спосіб і засоби транспортування (для еталона, який транспортують до місця його застосування);

- e) зазначають допустимі заміни складових частин еталона (наприклад, пристрої живлення, запису і оброблення даних тощо);
- f) проводять періодичний контроль умов зберігання еталона;
- g) призначають особу чи осіб, відповідальних за зберігання та застосування еталона.

3.9. Документація до еталона

Документи до еталона повинні містити таку основну інформацію:

- a) ім'я та адресу користувача (організації, лабораторії, особи);
- b) назва і позначення документа;
- c) назва і позначення еталона (тип, серійний номер тощо);
- d) виробник/постачальник еталона;
- e) дата купівлі і (або) дата введення в експлуатацію еталона;
- f) величина, номінальне значення або діапазон вимірювання, що відтворюється еталоном;
- g) точність або клас точності, невизначеність вимірювання разом з інформацією про її оцінювання;
- h) міжкалібрувальний інтервал з посиланням на документ/метод його визначання;
- i) відповідальна особа;
- j) місце перебування на даний час, якщо це доречно;
- k) класифікація еталона (вихідний, робочий).

Користувач (особа/службовець) несе відповідальність за застосування еталона лише тоді, коли його калібрувальний статус лишається чинним.

3.10. Висновки до розділу 3

1. Основними функціями еталона є відтворення, зберігання та передача розміру одиниці вимірювання.

2. Класифікація еталонів проводиться за сферою дії, за формою власності, за пріоритетом відтворення та зберігання одиниці, за призначенням та за складом.

3. Особливостями первинних еталонів у порівнянні з іншими засобами вимірювальної техніки є наявність процедури визнання еталона,

регламентація правил і умов зберігання і застосування еталона; що необхідність підтримання метрологічних характеристик еталона в установлених границях та звірення з еталонами інших країн; призначення ученого зберігача, який несе відповідальність за додержанням умов зберігання і використання державного еталона та його вдосконалення; регламентація необхідної документації до еталона, її своєчасна актуалізація.

4. При вибиранні еталону враховують метрологічні, технічні та економічні вимоги.

5. Для визнання еталона встановлюють такі вимоги: еталон має бути ідентифікованим, а його метрологічні і технічні характеристики документально оформленими; простежуваність величини, відтвореної еталоном, повинна бути документально зареєстрована; правила застосування і зберігання еталону повинні бути документально оформлені; невизначеність вимірювання за результатами калібрування еталона мусить бути оцінена та відповідати вимогам його застосування за призначеністю.

3.11. Контрольні питання до розділу 3

1. Дайте визначення еталона.
2. Якими функціями повинен володіти еталон?
3. Що таке відтворення одиниці вимірювань?
4. Що таке зберігання одиниці вимірювань?
5. Як здійснюється простежуваність величини, відтвореної еталоном, до основи порівняння?
6. Дайте визначення первинного, вторинного та робочого еталона.
7. Як класифікують еталони за сферою дії?
8. Як класифікують еталони за формою власності?
9. Як класифікують еталони за призначенням?
10. Як класифікують еталони за складом?
11. Які метрологічні вимоги враховують при вибиранні еталона?
12. Які технічні вимоги враховують при вибиранні еталона?
13. Які економічні вимоги враховують при вибиранні еталона?
14. Які умови встановлюються для визнання еталона?
15. На яких загальних положеннях базується застосування еталона?
16. Які існують основні правила зберігання еталона?
17. Яку основну інформацію повинні містити документи до еталона?

4. ЕТАЛОНИ ОСНОВНИХ ОДИНИЦЬ SI

У даному розділі дається стислий опис історії створення та принципів побудови первинних еталонів основних одиниць у відповідності з їх визначеннями у SI-2019.

4.1. Секунда

4.1.1. Коротка історія

Пошуки найкращого еталона часу, що відповідає вимогам необхідної точності, відтворюваності і доступності, мають велику історію. Ще в стародавності відлік часу ґрунтувався на періоді обертання Землі навколо своєї осі.

Донедавна секунду визначали як $1/86400$ частину середньої сонячної доби, тобто еталоном часу була “Земля, що обертається навколо своєї осі”. Пізніше було виявлено, що обертання Землі навколо своєї осі відбувається нерівномірно. Відносна похибка відтворення одиниці часу відповідно до цього визначення становила близько 10^{-7} , що було недостатньо для ряду практичних застосувань і наукових досліджень. Тому в основу визначення одиниці часу поклали період обертання Землі навколо Сонця – тропічний рік (тобто інтервал між двома весняними рівноденнями). Розмір секунди був визначений як $1/31556925,9744$ частина тропічного року. Оскільки тропічний рік також змінюється (близько 5 с за 1000 років), то за основу був узятий тропічний рік, віднесений до 12 год. ефемеридного часу (рівномірний поточний час, що визначається астрономічним шляхом) 0 січня 1900 року, що відповідає 12 годині 31 грудня 1899 р. Це визначення секунди було зафіксовано в Міжнародній системі одиниць 1960 р. Дане рішення дозволило на 3 порядки (у 1000 разів) знизити похибку визначення одиниці часу, а еталоном часу стала “Земля, що обертається навколо Сонця” [16, 20, 26].

Неважко бачити, що при такому формулюванні секунда набула достатню визначеність, більшу точність, проте утратила відтворюваність

(оскільки була прив'язана до певного року) і не стала більш доступною. Тому пошуки найкращого еталона часу, а також конструкції годинників, за допомогою яких можна було б зберігати одиницю і шкалу часу, продовжувалися. Відомі стародавні пісочні, водяні, вогненні годинники, колісні більш близького до нас часу. З механічних конструкцій найкращого результату вдалося домогтися за допомогою маятникових годинників. У 50-х роках минулого століття радянський український інженер Ф.М. Федченко шляхом удосконалення підвісу маятника і його термокомпенсації одержав рекордні для маятникових годинників цифри за стабільністю: добова варіація їхнього ходу становила $(2-3) \cdot 10^{-4}$ с.

Значним подальшим кроком була розробка в 1927 році Морісоном і Хорстоном (США) кварцових годинників. У найбільш досконалих конструкціях цих годинників (генераторів) добова нестабільність складала $(1-2) \cdot 10^{-6}$ с.

Однак, до справжнього “прориву” у створенні еталона часу привели успіхи атомної і квантової фізики, що дозволили використовувати частоту електромагнітного випромінювання або поглинання при енергетичних переходах молекул і атомів для визначення розміру одиниці часу.

4.1.2. Атомна секунда

Першим кроком у цьому напрямку було використання електромагнітного випромінювання молекул і створення молекулярних аміачних годинників (1953, Г. Ліукс), нестабільність ходу яких становила близько $1 \cdot 10^{-7}$. Усі подальші зусилля не дозволили знизити нестабільність менше за $1 \cdot 10^{-8}$, але була встановлена причина, що обмежує можливості молекулярного генератора – хаотичний тепловий рух часток газу (так званий подовжній ефект Доплера). Подальші дослідження дозволили значною мірою подолати вплив цього ефекту.

- На початку 60-х р. група вчених з NBS, США (нині NIST¹) створила квантовий генератор на основі цезію, в якому вдалося майже цілком уникнути подовжнього ефекту Доплера. У перших моделях цезієвого генератора нестабільність становила близько $1 \cdot 10^{-9}$, але надалі її вдалося істотно знизити. Крайні сучасні цезієві генератори (стандарти

¹ NIST – національний інститут стандартів і технологій США

частоти) мають нестабільність на рівні 10^{-14} при відтворюваності частоти порядку $5 \cdot 10^{14}$.

Приблизно в ці ж роки були створені перші водневі квантові стандарти, що сьогодні, після серії вдосконалень, за рядом параметрів не поступаються цезієвому, зокрема, за стабільністю. Вважається, що цезієві генератори перевершують усі інші за відтворюваністю, що визначає систематичну похибку еталона, а водневі є найкращими за стабільністю. Саме тому сьогодні визначення і відтворення одиниці часу здійснюються через період випромінювання атомів цезію, а її збереження реалізується з використанням водневих генераторів.

XIII Генеральна конференція з мір та ваг у 1967 р. прийняла нове визначення одиниці часу – секунди: **“Секунда – це час, який дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133”**. Вибір кількості коливань зроблений таким чином, щоб прив’язати “цезієву” секунду до “тропічної”.

4.1.3. Реалізація атомної (квантової) секунди

Первинні еталони частоти повинні генерувати електричні коливання на частоті, зв’язок якої з частотою переходу атома цезію-133, що визначає секунду, відомий з дуже малою невизначеністю [16, 25, 38].

Відповідно до визначення одиниці часу, її відтворення в першу чергу, може здійснюватися цезієвим репером (рис. 4.1). Суть роботи репера полягає в стабілізації частоти кварцового генератора за частотою випромінювання атомів цезію. Основою еталона є атомно-променева трубка. Атоми цезію-133 випромінюються нагрітим до температури 100-150 °C джерелом 1 (цезієва піч). Пучок цих атомів потрапляє до області неоднорідного магнітного поля, створюваного магнітом 2. Кут відхилення атомів у такому магнітному полі визначається їхнім магнітним моментом. Тому неоднорідне магнітне поле дозволяє виділити з пучка ті атоми, що знаходяться на певному енергетичному рівні. Ці атоми спрямовуються в об’ємний резонатор 3, пролітаючи через який взаємодіють із змінним електромагнітним полем визначеної частоти. Частота електромагнітних коливань може регулюватися в невеликих межах.

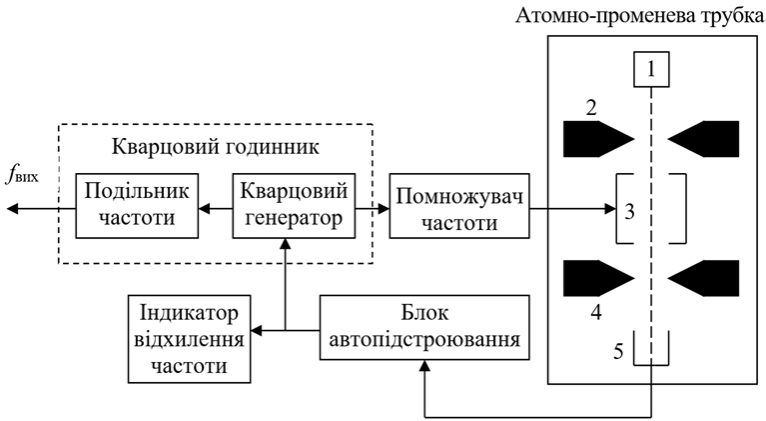


Рис. 4.1. Структурна схема цезієвого репера:

1 – джерело атомів цезію-133; 2, 4 – магніти; 3 – резонатор; 5 – детектор

При збігу частоти електромагнітного поля з частотою квантових переходів відбувається поглинання енергії НВЧ-поля, і атоми переходять в основний стан. У магнітній системі 4 здійснюється вторинна сепарація, у результаті чого атоми, що знаходяться у відповідному стані, спрямовуються в детектор 5. Струм детектора при настроюванні резонатора на частоту квантових переходів є максимальним. Це є основою стабілізації частоти в цезієвому репері. Для замикання кільця автопідстроювання частота коливань кварцового генератора (зазвичай 5 МГц) помножується до частоти квантового переходу в цезії.

Системи з використанням атомно-променевої трубки на цезії, як правило, будуються за пасивною схемою, коли квантовий стандарт частоти (КСЧ) відіграє роль квантового дискримінатора, тобто енергія НВЧ коливань поглинається атомами цезію.

При відхиленні частоти кварцового генератора від номінального значення інтенсивність переходів атомів і, отже, щільність атомного пучка на виході трубки різко зменшується. Блок автопідстроювання, зв'язаний з трубкою, виробляє сигнал помилки, що повертає частоту кварцового генератора до номінального значення. Подільник частоти, що знаходиться в кварцовому годиннику, дозволяє одержати на їхньому виході необхідні частоти і часові інтервали (у тому числі і частоту 1 Гц).

Відтворення одиниць часу і частоти за допомогою метрологічного цезієвого репера класичного пучкового типу здійснюється з НСП близько $(3\text{-}5) \cdot 10^{-14}$.

Одиниця часу може також бути відтворена за допомогою водневого квантового генератора. Крім того, водневий генератор відіграє роль основного зберігача одиниць часу і частоти. Стисло розглянемо принцип його роботи (рис. 4.2).

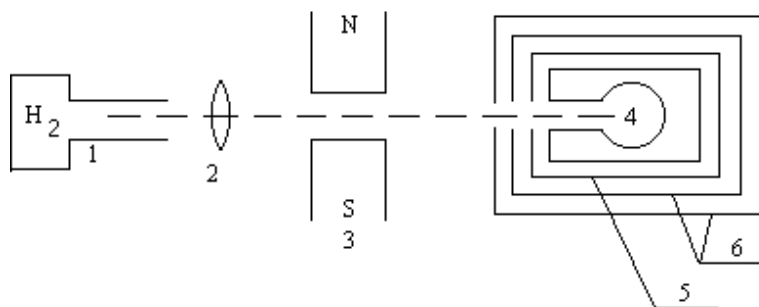


Рис. 4.2. Функціональна схема водневого генератора:

- 1 – балон з воднем; 2 – коліматор; 3 – осьовий магніт;
4 – накопичувальний осередок; 5 – резонатор; 6 – багатошаровий екран

У балоні 1 під дією високочастотного електричного розряду відбувається дисоціація молекул водню. Пучок атомів водню через коліматор 2, який забезпечує його спрямованість, потрапляє в неоднорідне магнітне поле багатополюсного осьового магніту 3, де проходить просторове сортування (сепарацію). У результаті останньої на вхід накопичувального осередку 4, розташованого в об'ємному резонаторі 5, потрапляють лише атоми водню, що знаходяться на потрібному енергетичному рівні. Високодобротний резонатор, що знаходиться усередині багатошарового екрана 6, настроєний на частоту квантового переходу. Взаємодія збуджених атомів з високочастотним полем резонатора (протягом приблизно 1 с) приводить до їхнього переходу на нижній енергетичний рівень з одночасним випромінюванням квантів енергії на частоті 1420405751,8 Гц. Це викликає самозбудження генератора, частота якого відзначається високою стабільністю.

Водневий стандарт частоти зазвичай є активним пристроєм, тобто відіграє роль квантового генератора, за частотою якого через систему синтезу частот і фазового автопідстроювання частоти стабілізується частота кварцового генератора (рис. 4.3, 4.4) [25, 26].

Характеристики різних квантових стандартів наведені в табл. 4.1.

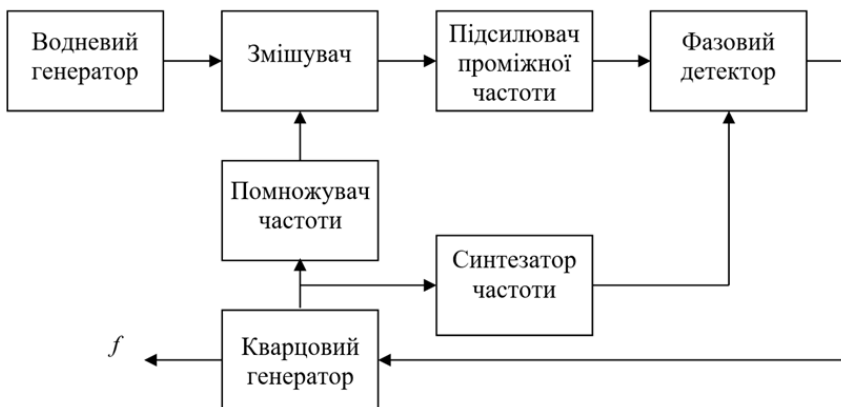


Рис. 4.3. Структурна схема водневого стандарту частоти



Рис. 4.4. Зовнішній вигляд водневих стандартів частоти

Таблиця 4.1

Порівняльні характеристики квантових стандартів

Тип квантового стандарту	Тип переходу, акт./пасив.	Частота, МГц	Розширена невизначеність	Позитивні риси	Недоліки	Основне використання
Цезієвий стандарт (пучковий)	Надтонкий, пасивний	9192,63177	$1 \cdot 10^{-14}$	Найвища відтворюваність і довгочасова стабільність	Недостатня короткочасова стабільність	Первинний еталон (відтворення секунди)
Водневий стандарт	Надтонкий, активний	1420,40515	$(1-3)10^{-14}$	Висока відтворюваність, короткочасова і довгочасова стабільність	Великі габарити і маса	Первинний еталон (зберігання секунди)
Рубідієвий стандарт	Надтонкий, активний і пасивний	6834,682	$1 \cdot 10^{-13}$	Технологічність, малі габарити і маса. Достатньо висока короткочасова і довгочасова стабільність	Потребує калібрування за первинними еталонами	Вторинні та робочі еталони
Аміачний стандарт	Молекулярна інверсія, активний	23870,129	$(1-5)10^{-11}$	Задовільна відтворюваність і стабільність	Залежність характеристик від конструкції і зовнішніх впливів	Робочі еталони

4.1.4. Еталон одиниць часу і частоти

До складу первинного еталона часу і частоти розвинутих країн, як правило, входять такі системи, що забезпечують виконання його основних функцій:

- апаратура відтворення і збереження одиниць часу і частоти, основними елементами якої на цей час є цезієвий репер і водневі стандарти частоти;
- апаратура формування і збереження шкал атомного і координованого часу;
- система внутрішніх зв'язів для проведення взаємних зв'язів частот і сигналів часу різних зберігачів і проведення їхнього коригування (фазові і частотні компаратори, вимірювачі характеристик сигналів тощо);

- система зовнішніх звірень, що забезпечує передачу розмірів одиниць і шкали часу вторинному і робочому еталонам, а також звірення національної шкали зі шкалами часу інших країн. Це можуть бути спеціальні навігаційні системи, телевізійна апаратура, радіометеорна система, апаратура фазових звірень, транспортбельний квантовий годинник.

Наведемо основні метрологічні характеристики державного еталона часу і частоти України [26, 37]:

- 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 відтворення одиниць – від $5 \cdot 10^{-14}$ до $1 \cdot 10^{-13}$.

Еталон України активно співпрацює з еталонами інших країн.

4.1.5. Розвиток технологій квантового генерування

4.1.5.1. Цезієвий “фонтан”

Основним обмеженням точності цезієвого репера пучкового типу вважається взаємний рух атомів цезію теплового характеру. З відкриттям лазерних методів охолодження атомів, що ґрунтуються на взаємодії атомів з фотонами світла, це обмеження вдається перебороти і підвищити точність приблизно на два порядки. Поєднання ідей цезієвого репера вертикальної конструкції і лазерного охолодження привело до створення в ряді країн так званого “цезієвого фонтану” (рис. 4.5).

Свою назву він одержав тому, що охолоджені до температури менше 1 мкК атоми цезію у визначеному квантовому стані запускаються угору у вакуумі, а потім, під дією сили ваги опускаються вниз і в балістичному польоті проходять через резонатор, де взаємодіють з магнітним полем, під дією якого переходять в інший стан. За даними зарубіжної преси цезієвий фонтан дозволяє знизити нестабільність частоти до декількох одиниць шістнадцятого знака за рахунок зниження практично до нуля теплових швидкостей атомів.

Слід також сказати, що в подальшому значну еволюцію пройшли і самі технології лазерного охолодження. Спочатку це було охолодження за допомогою “оптичної патоки” – створення на перехресті шести лазерних

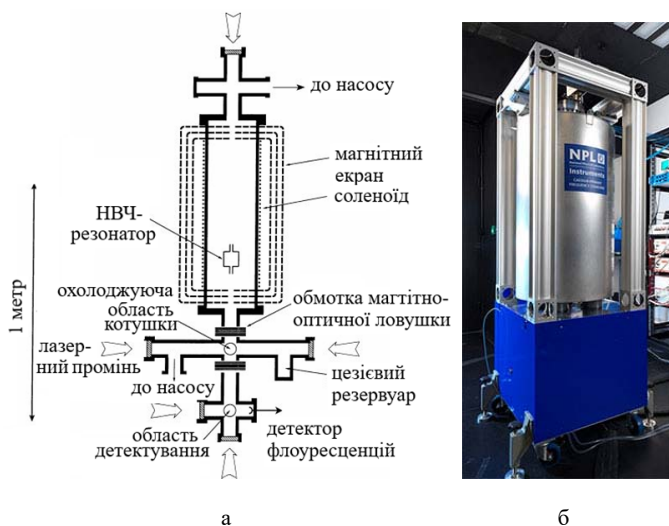


Рис. 4.5. Цезієвий фонтан NPL
а – структурна схема; б – зовнішній вигляд

променів щільного кріотенного середовища з температурою близько $0,1\text{K}$, потім були спеціальні *магнітно-оптичні пастки* (Пфенінга, Пола), *оптичні решітки* тощо (рис. 4.6).

Створений на основі цих технологій цезієвий фонтан має значно меншу нестабільність частоти, ніж цезієвий генератор пучкового типу, за рахунок зниження практично до нуля теплового руху атомів. На цей час такі еталони мають ряд передових країн, їх відносна невизначеність складає близько $1 \cdot 10^{-16}$.

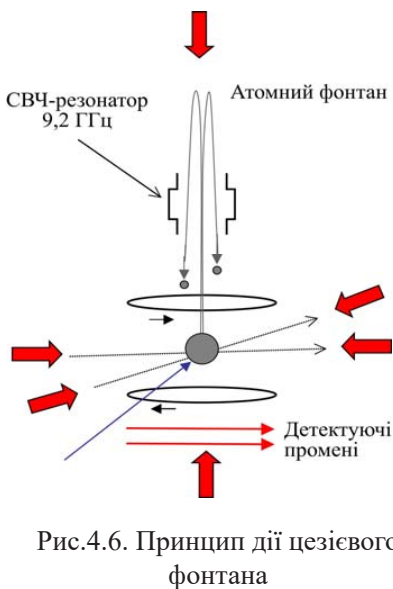


Рис.4.6. Принцип дії цезієвого фонтана

Але ще більш перспективними вважаються стандарти частоти, що працюють не в радіочастотному, а в оптичному діапазоні, зокрема, на переходах в стронції, ітербії і ртуті (рис. 4.7). З'явилися публікації про створення в РТВ (Німеччина) стронцієвого стандарту частоти на частоті 429 ТГц (оптичний діапазон) з невизначеністю на рівні $(1-3) \cdot 10^{-17}$ [25, 39].

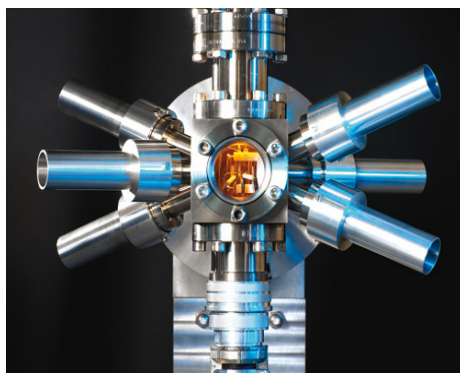


Рис. 4.7. Оптичний годинник на іонах стронцію

Тут треба кілька пояснень. На початку ХХІ століття відбулися події, які назвали “великим синтезом лазерних технологій” [25, 26, 40]. Окрім лазерів неперервного генерування були створені *лазери дуже коротких (фемтосекундних) імпульсів*, спектр яких являє “частотну гребінку” аж до оптичного діапазона, тобто свого роду частотну лінійку. Це дало можливість дослідження *оптичних стандартів частоти*, оскільки точне вимірювання частоти в оптичному діапазоні є проблемою. Про фемтосекундні лазери докладніше буде нижче.

4.1.5.2. Оптичні стандарти частоти (ОСЧ)

ОСЧ ґрунтуються на переходах в іонах різних хімічних елементів на частотах, що на кілька порядків перевищує робочу частоту цезієвих стандартів. Було доведено, що стабільність різних ОСЧ може підтримуватися на рівні від $1 \cdot 10^{-17}$ до $1 \cdot 10^{-18}$ [39, 40] (рис. 4.8).

Принцип дії пояснюється схемою, наведеною на рис. 4.9. У цій схемі частота ітербієвого ОКГ стабілізується за допомогою магнітооптичної пастки. Далі через систему АПЧ підстроюється частота оптичного годинника 344 ТГц, яка точно вимірюється за допомогою частотної гребінки фемтосекундного лазера, опорною якого є цезієвий фонтан 5 МГц.

В експериментальному зразку стронцієвого оптичного годинника, розробленого в Токійському університеті, іони стронцію знаходяться в

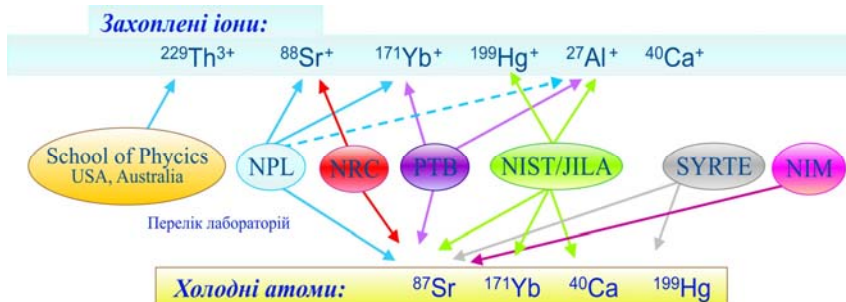


Рис. 4.8. Варіанти стандартів частоти оптичного діапазону

[Setup for absolute optical frequency measurements](#)

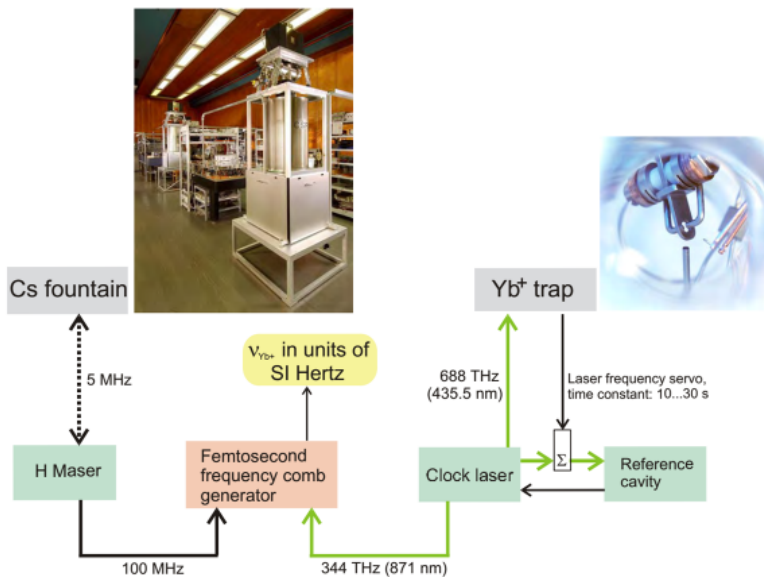


Рис. 4.9. Структурна схема стронцієвого стандарту частоти

“оптичний пастці” на перехресті шести лазерних променів (температура 0,1К), під впливом яких вони утримуються в “енергетичних ямах”, майже не взаємодіючи і випромінюючи коливання електромагнітних хвиль. При цьому нестабільністю частоти цих коливань складає близько $1 \cdot 10^{-17}$.

У 2012 році група вчених з Університету Нового Південного Уельса, Технологічного інституту Джорджії і Університета Невади встановила, що ядерний годинник на основі торію-229 теоретично на кілька порядків точніше всіх існуючих аналогів. Можна очікувати, що в найближчому майбутньому будуть створені оптичні стандарти частоти з відносною нестабільністю на рівні $1 \cdot 10^{-18}$, що не виключає введення нового визначення секунди.

24-а CGPM прийняла спеціальну Резолюцію про розробку нових *оптичних еталонів частоти*. В Резолюції відзначаються швидкі темпи вдосконалення характеристик оптичних еталонів частоти, успішна робота НМІ над методиками проведення звірень цих еталонів, наголошується на необхідності подальшої роботи в цьому напрямку.

4.2. Метр

4.2.1. Коротка історія

Наприкінці XVIII ст., у період уведення метричної системи мір, Національні збори Франції прийняли одну десятимільйонну частину чверті Паризького меридіана як одиницю довжини – метр. У 1799 р. на основі геодезичних вимірювань (триангуляцій) частини дуги меридіана від Дюнкерка до Барселони експедиціями вчених на чолі з Мешеном і Деламбром¹ був виготовлений еталон метра у вигляді платинової кінцевої міри, переданої на збереження в національний Архів Франції. Цей еталон отримав назву “метра Архіву”. Метр Архіву являє собою платинову лінійку шириною близько 25 мм, товщиною близько 4 мм із відстанню між кінцями, що дорівнює 1 м (рис. 4.10, а).

Повторні вимірювання довжини дуги меридіана, виконані в XIX ст., довели, що довжина прийнятого метра дещо коротше справжнього “природного” метра. Оскільки надалі, при більш точних вимірюваннях, можливо було б одержати різні значення основної одиниці довжини, Міжнародна комісія з прототипів метричної системи у 1872 р. вирішила відмовитися від природного еталона метра і прийняти як вихідну міру

¹ P.-F. Mechain, J.-B. Joseph Delambre

метр Архіву. Відповідно до рішення цієї комісії був виготовлений 31 еталон метра у вигляді штрихової міри зі сплаву платини й ірідію. З них метр номер 6 виявився при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ рівним метру Архіву і був прийнятий як міжнародний прототип метра. Інші 30 еталонів були розподілені між різними державами.

Еталон метра являв собою платино-іридієвий брусок довжиною 102 см, що має в поперечному перерізі форму X (рис. 4.10, б).



а



б

Рис. 4.10. Бронзова та платинова кінцеві міри довжини (метр Архіву) (а) і платино-іридієвий штриховий еталон метра (б), що зберігаються в Архіві Франції

Платино-іридієвий еталон метра номер 28, отриманий Росією в 1889 р., був у подальшому затверджений як державний еталон. Одиниця довжини – метр визначається відстанню між осями двох середніх

штрихів, нанесених на бруску, при 0 °С. Хоча еталон був виготовлений зі сплаву іридію і платини, що відрізняється значною твердістю і стійкістю до окислювання, не було повної впевненості в тому, що довжина еталона з часом не зміниться.

Тому необхідно було ввести новий природний еталон метра. У 1895 р. II Генеральна конференція з мір та ваг визнала, що природним носієм розміру метра може бути довжина хвилі мо-нохроматичного світла.

Після вивчення спектральних ліній ряду елементів було знайдено, що найбільшу точність відтворення одиниці довжини забезпечує оранжева лінія ізотопу криптону-86. XI Генеральна конференція з мір та ваг (1960 р.) прийняла визначення розміру метра в такому вигляді: “Метр – довжина, що дорівнює 1 650 763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптону-86”.

При дослідженні спектрів різних речовин було виявлено, що найбільш тонкі і симетричні лінії випромінювання відповідають переходу між вищезгаданими рівнями атома криптону-86.

Здійснення цього методу дало можливість знизити похибку відтворення метра приблизно до $4 \cdot 10^{-9}$ м (СКВ). Однак і цієї точності виявилось недостатньо для вирішення ряду науково-технічних задач. Пошуки кращого еталона продовжувалися.

У 1960 році, коли за еталон довжини прийняли криптоновий стандарт, було створено лазер, і почався активний розвиток лазерної техніки. Виявилось, що газовий лазер на суміші гелію і неону може генерувати надзвичайно вузькі спектральні лінії, значно вужчі, ніж у ізотопу криптону. Однак, частоти ліній *He-Ne* лазера можуть “плавати”, змінюватися неконтрольованим чином. Тому, щоб одержати нове джерело світла з вузькою шириною спектра, необхідно було стабілізувати частоту лазерного випромінювання. Після того, як така стабілізація була досягнута, *He-Ne* лазери стали забезпечувати генерацію дуже вузьких ліній зі стабільністю частоти того ж порядку, що і в стандартах часу. Таким чином, виникла можливість використання стабілізованих лазерів як стандартів довжини замість криптонового еталона. Цьому сприяла ще одна обставина.

На початку 1970-х років у США, Англії і СРСР були виконані експерименти з уточнення швидкості світла у вакуумі, засновані на незалежному вимірюванні частоти ν і довжини хвилі λ високостабільного лазера

($c = v \cdot \lambda$). Обробка результатів цих експериментів дала значення швидкості світла $c = 299792458 \pm 1,2$ м/с з відносною похибкою $4 \cdot 10^{-9}$ (до цього було $3 \cdot 10^{-7}$), тобто точність була підвищена на два порядки. Але подальше уточнення значення c було неможливим, оскільки число $4 \cdot 10^{-9}$ цілком було обумовлено точністю еталона довжини, шляхом порівняння з яким обчислювалась довжина хвилі λ . Вихід з цього положення виявився доволі несподіваним і оригінальним. Було вирішено: не намагатись далі уточнювати значення c , а одержане значення 299792458 м/с прийняти за **світлову сталу**. Оскільки швидкість пов'язує відстань і час, це дозволило дати нове визначення метра – через одиницю часу. І у 1983 році на XVII Генеральній конференції з мір та ваг було прийнято нове визначення: **“Метр – це відстань, яку проходить світло у вакуумі за $1/299792458$ частинку секунди”**.

Визначення метра в системі SI-2019 принципово не змінилось, лише було прийнято формулювання, що метр встановлюється **“фіксуванням числового значення швидкості світла у вакуумі, c , 299 792 458 точно, коли вона виражена через одиницю $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, де секунда визначена через частоту цезію, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ”**.

Це визначення є адекватним попередньому, забезпечуючи таким чином незмінність одиниці довжини в системах SI-1983 і SI-2019.

Фундаментальне рівняння, що лежить в основі вищевказаного визначення метра, – це пряма залежність між довжиною, інтервалом часу й швидкістю світла:

$$l = c \cdot \Delta t$$

де c – фіксоване значення швидкості світла у вакуумі, Δt – час проходження світлом геометричного шляху довжиною l .

Отже, практичну реалізацію визначення метра може бути здійснено одним із таких первинних методів [24, 25, 42]:

а) прямим вимірюванням часу Δt проходження світлом геометричного шляху;

б) опосередкованим вимірюванням часу проходження світлом геометричного шляху.

Пряме вимірювання часу проходження світлом геометричного шляху значною мірою застосовується для вимірювань великих відстаней в умовах існування атмосфери, при цьому необхідно враховувати показник заломлення повітря,

Непряме (опосередковане) вимірювання з використанням оптичної інтерферометрії застосовується для реалізації довжин менш ніж декілька метрів, а також для здійснення **найточнішої** реалізації одиниці довжини (**первинного еталона**).

4.2.2. Сучасний первинний еталон одиниці довжини

Неважно бачити, що для реалізації еталона довжини відповідно до визначення через швидкість світла необхідно вирішити такі задачі:

- створити монохроматичне високостабільне (за частотою) джерело когерентного світлового випромінювання;
- виміряти частоту f цього випромінювання для визначення довжини його хвилі λ зі співвідношення $\lambda = c/f$;
- передати розмір одиниці довжини з діапазону довжин світлових хвиль (мікрометри) у діапазон практичного використання (поблизу метра).

Таким чином, класична структура еталона одиниці довжини містить у собі еталонне джерело коливань у видимій області спектра (ОКГ); систему стабілізації і вимірювання частоти цього джерела; систему передачі розміру одиниці довжини від “хвильового метра” до його матеріальних носіїв – штрихових і кінцевих мір,

В самому загальному вигляді схема первинного еталона довжини має вигляд, наведений на рис. 4.11. Еталон складається з трьох основних систем: квантового джерела світлової хвилі (лазера), системи вимірювання абсолютної частоти цього джерела, системи передавання розміру одиниці матеріальним мірам (штриховим і кінцевим) довжиною поблизу 1 м і менше (інтерферометр-компаратор).

Носієм еталонної довжини в цій схемі є довжина світлової хвилі лазера $\lambda = c/f = cT_e$ і саме завдяки створенню лазерів – джерел монохроматичного когерентного високостабільного випромінювання в оптично-му діапазоні – стало можливим створення даного еталона.

Розглянемо основні системи еталона.

До складу еталонного джерела випромінювання первинного еталона довжини, відповідно до рекомендації МБМВ, входить група $He - Ne/J_2$ лазерів (рис. 4.12), стабілізованих з використанням ефекту насиченого поглинання в йоді-127 (довжина хвилі $\lambda = 0,633$ мкм, частота 473613, ... ГГц).

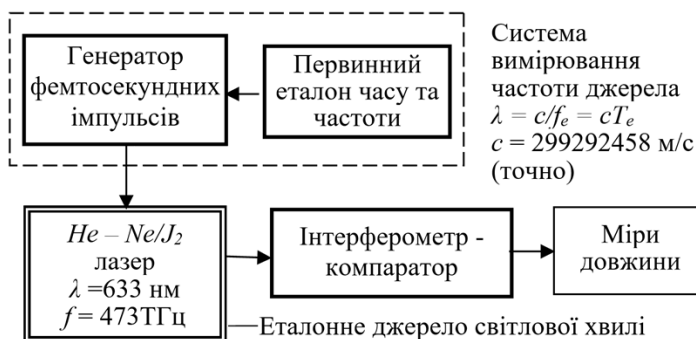


Рис. 4.11. Спрощена схема еталона часу-частоти- довжини



Рис. 4.12. $\text{He} - \text{Ne}/J_2$ лазер Winters M100

Дане групове джерело має нестабільність $7 \cdot 10^{-12}$, стандартну невизначеність відтворення довжини хвилі близько $1 \cdot 10^{-11}$.

Точне вимірювання частоти лазерного джерела раніше здійснювалось за допомогою радіооптичного частотного моста (РОЧМ).

Однак створення РОЧМ і вимірювання за його допомогою частоти $\text{He} - \text{Ne}/J_2$ лазера (близько 473 ТГц) – надзвичайно складне завдання. Тому надалі було обрано інший шлях його вирішення.

4.2.3. Фемтосекундний лазер (“частотна гребінка”)

Вище було сказано про роль цих лазерів для досліджень в оптичному діапазоні. Це титан-сапфірові лазери, що генерують послідовність ультракоротких (фемтосекундних) імпульсів, спектр яких простирається до оптичного діапазону і який назвали “*частотною гребінкою*”. Спектр випромінювання такого лазера являє собою дискретний еквідистантний спектр – свого роду частотну лінійку, Це дозволило вирішити цілий ряд важливих задач в метрології, а саме, виміряти абсолютні значення частот випромінювання стандартів частоти оптичного діапазону (на поодиноких іонах, охолоджених атомах або молекулах) [42].

Оптичні імпульси з тривалістю τ_0 у часовій області мають вигляд, наведений на рис. 4.13. Спектр оптичних імпульсів подано на рис. 4.14.

Часова відстань між імпульсами $T_R = 1/f_R$ визначається частотою повторення (проходження) імпульсів і залежить від довжини резонатора. Тому для забезпечення стабільності T_R необхідно стабілізувати довжину резонатора. Другий параметр, який визначає точність вимірювання частоти, – фазовий зсув $\Delta\phi$ між обвідною імпульсу і несучою оптичною частотою і його стабільність.

Частота кожної складової спектра визначається номером гармоніки, частотною відстанню між імпульсами і частотою, на яку зсунута вся частотна лінійка відносно нуля частотної осі. Таким чином, для вимірювання оптичних частот лазерів необхідно з високою точністю знати значення f_R і ν . Оскільки ці параметри знаходяться в радіодіапазоні, їх вимірювання проводиться за допомогою прецизійних частотомірів, каліброваних водневим або рубідієвим стандартом частоти (пов’язаним з первинним цезієвим стандартом).

Керування $\Delta\phi$ дозволяє реалізувати схему стабілізації цього параметра, яка залежить від конструктивних особливостей лазера [39].

В устрої для генерації оптичної гребінки, яке в спеціалізованій літературі одержало назву *суперконтініума*, використовується спеціальне оптоволокно типу фотонного кристалу [40].

Часова відстань між імпульсами $T_R = 1/f_R$ визначається частотою повторення (проходження) імпульсів і залежить від довжини резонатора. Другий параметр, який визначає точність вимірювання частоти, – фазовий зсув $\Delta\phi$ між обвідною імпульсу і несучою оптичною частотою.

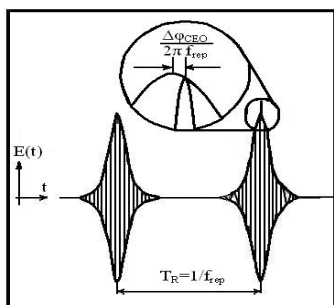


Рис. 4.13. Оптичні імпульси в функції часу

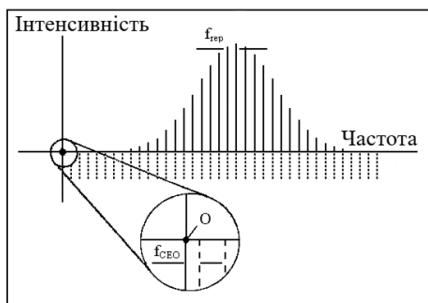


Рис. 4.14. Спектр оптичних імпульсів

Частота кожної складової спектра визначається номером гармоніки, частотною відстанню між імпульсами і частотою, на яку зсунута вся частотна лінійка відносно нуля частотної осі. Таким чином, для вимірювання оптичних частот лазерів необхідно з високою точністю знати значення f_R і ν . Оскільки ці параметри знаходяться в радіодіапазоні, їх вимірювання являє реальне завдання.

Апаратура реалізована в провідних інститутах світу [25, 26].

Передача розміру одиниці “хвильового” метра від $He - Ne/J_2$ лазера до штрихових і кінцевих мір довжини близько одного метра здійснюється за допомогою інтерференційного методу шляхом підрахунку числа $N + \delta$ напівхвиль $\lambda/2$, що укладаються на вимірюваній довжині $L = \lambda(N + \delta)/2$, де δ – дробова частина порядку інтерференції (вимірюється модуляційним методом) [39, 41].

Для здійснення цих вимірювань до складу еталона входить спеціальний інтерференційний компаратор (рис. 4.15).

Зазначимо, що для високоточних вимірювань довжини за допомогою інтерферометрів необхідно забезпечувати стабільні параметри навколишнього середовища, з високою точністю вимірювати температуру, вологість, враховувати показник заломлення атмосфери середовища через неповний вакуум і т.д. Усе це вимагає створення спеціальних термостатованих приміщень і досить складного додаткового устаткування. В первинному еталоні одиниці довжини України всю відповідну апаратуру розміщено в спеціальній термобарокамері, а процеси вимірювання й обробки результатів автоматизовано [41].



Рис. 4.15. Інтерференційний компаратор:

- 1 – система лазерна вимірювальна XL-80; 2 – напрямні; 3 – основа;
4 – каретка; 5 – вузол приводу каретки з кроковим двигуном;
6 – блок живлення крокового двигуна; 7 – блок керування кроковим двигуном; 8 – приймач радіосигналу; 9 – модуль відеозахоплення;
10 – система обробки зображення; 11 – блок вимірювань температури

Наведемо метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці довжини України [26, 41]:

- діапазон вимірювань, 0 – 1,0 м;
- стандартна невизначеність від $3 \cdot 10^{-11}$.

Еталон забезпечує передачу розміру одиниці довжини мірам довжини, вимірювачам і перетворювачам лінійних переміщень.

Ці характеристики відповідають світовому рівню.

Відзначимо, що в складі первинного еталона України поки відсутній фемтосекундний лазер, який дозволяє напряму вимірювати частоту $He - Ne/J_2$ лазера, але ця частота вимірюється опосередковано і контролюється її незмінність [26].

Як зазначалося вище, прийняття визначення метра через швидкість світла привело до прямого зв'язку одиниць часу (частоти) і довжини. Отже, у сукупності державний еталон часу-частоти, система стабілізо-

ваних лазерів і вимірювання їх частоти, інтерферометричний компаратор складають єдиний еталон одиниць *часу, частоти і довжини*.

4.2.4. Технології вимірювання великих і малих довжин

4.2.4.1. Великі довжини [42]

Для вимірювання великих довжин використовується технологія лазерної далекометрії і відповідні засоби – лазерні далекоміри, які, як правило, бувають двох типів: імпульсні і фазові.

Імпульсний лазерний далекомір

Імпульсний лазерний далекомір складається з імпульсного лазера та детектора випромінювання. Вимірюючи час затрачений імпульсом на шлях до перешкоди і назад, помноживши його на швидкість світла, одержуємо відстань від лазера до перешкоди:

$$L = \{c/2n\}t$$

де c – швидкість світла, n – показник заломлення середовища, t – час проходження імпульсу до перешкоди і назад.

Точність вимірювання відстані визначається точністю вимірювання часу. Чим коротше фронт імпульсу, тим точніше можна виміряти відстань.

Фазовий лазерний далекомір

Фазовий лазерний далекомір вимірює відстані на основі порівняння фаз посланого і відбитого променів. У нього більша точність порівняно з імпульсним далекоміром. Також він більш дешевий у виробництві, а тому більш поширений у користувачів.

4.2.4.2 Малі довжини [42]

В нанометрії Робочою групою ССЛ як вторинний еталон довжини рекомендована довжина ребра елементарної кристалічної ґратки кремнію. Цитуємо:

“Міжплощинна відстань у кристалічній ґратці кремнію-220, $d_{220} = 192,015\ 571\ 4 \times 10^{-12}$ m, може застосовуватися як вторинна реаліза-

ція визначення метра для використання у галузі метрології, що займається лінійними й кутовими вимірюваннями в наноіндустрії, використовуючи зазначені нижче методики й враховуючи пов'язані з ними застереження та обмеження щодо невизначеності вимірювання. Особливо заслуговують на увагу такі методи:

- рентгенівська інтерферометрія для метрології переміщень об'єктів;
- калібрування збільшених зображень за допомогою просвічуючих електронних мікроскопів (ТЕМ)».

Це рішення ССЛ є надзвичайно важливим для подальшого розвитку одної з найактуальніших галузей сучасної метрології – *нанометрії*.

4.3. Ампер

4.3.1. Коротка історія

На відміну від таких галузей вимірювання, як просторові і часові, де існували природні інваріанти (період обертання Землі і її геометричні розміри), які були покладені в основу розмірів секунди і метра при створенні метричної системи, в електричних вимірюваннях на час становлення їх, як окремого виду (початок 20 століття) не були відомі стабільні явища, які б могли бути покладені в основу розмірів електричних одиниць. Тому з самого початку метрологія в електриці розвивалася шляхом порівняння з механічними і фізико-хімічними явищами і одиницями.

Через це довелося відмовитися від одиниці кількості електрики як основної електричної одиниці і прийняти як таку одиницю сили струму – *ампер*. Розмір ампера можна було б відтворювати за тепловими, хімічними або пондеромоторними (механічними) діями струму.

У 1893 р. Міжнародний конгрес електриків у Чикаго прийняв перший еталон одиниці сили електричного струму, встановивши так званий міжнародний ампер. Ампер відтворювався за допомогою “срібного” вольтметра і мав таке визначення: *міжнародний ампер* – незмінний струм, який, проходячи через водяний розчин азотнокислого срібла за дотримання прикладеної специфікації, виділяє 0,001118 м срібла за 1 секунду.

У 1927 р. був створений Консультативний комітет з електрики при МКМВ, який почав роботу з перевизначення одиниць. У 1933 р. за рекомендації цього комітету МКМВ прийняв рішення про відтворення електричних одиниць через *механічні*. Перше успішне відтворення ампера було проведено в США вже на наступний рік. У цьому експерименті значення сили струму визначалося за силою взаємодії двох дуже точно виготовлених котушок, через які протікав вимірюваний струм. Таким чином, була доведена можливість відтворення ампера через одиниці сили і довжини.

IX Генеральна конференція з мір та ваг у 1948 р. прийняла таке визначення ампера: **“Ампер – сила незмінного струму, який під час протікання по двох нескінченно довгих паралельних прямолінійних провідниках нехтовно малого кругового поперечного перерізу, розташованих на відстані 1 м один від одного у вакуумі, спричинив би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н”.**

Приведене формулювання містить поняття нескінченно тонких і нескінченно довгих провідників, які на практиці здійснити неможливо. Однак на основі законів електродинаміки можна розрахувати з високою точністю силу взаємодії струмів, що протікають по провідниках кінцевих розмірів.

Для реалізації еталона ампера в ряді країн були сконструйовані спеціальні “струмові ваги”. НСП відтворення розміру одиниці струму цього еталона становило близько $1 \cdot 10^{-5}$, СКВ – $4 \cdot 10^{-6}$. Точності цього еталона було явно недостатньо для розвитку електричних вимірювань, а технічні можливості її підвищення були фактично вичерпані.

Але відкриття макроскопічних квантових ефектів *ядерного магнітного резонансу* (1946 р.) [30, 31], *тунелювання електронів* через тонкий шар діелектрика між двома надпровідниками (1964 р. *ефект Джозефсона*) [28], *квантового ефекту Холла*, (1980 р. Клітцинг [29]) зробили революцію в електричній метрології.

У 1990 р., було рекомендовано здійснювати на практиці відтворення вольт і ома на основі квантових ефектів, залишивши визначення ампера в SI через механічні величини і стали μ_0 . Такий підход одержав назву *практичної системи і*, з одного боку, дозволив підняти точність електричних вимірювань, але з другого, породив дуалізм в електричній метрології.

З 2019 р у новій СІ діє визначення ампера через *елементарний заряд*, що покінчило з дуалізмом і розв’язало всі протиріччя, пов’язані з використанням квантових методів. Таким чином, ампер на цей час відтворюється з використанням квантових технологій.

4.3.2. Відтворення ампера у SI-2019

Можливі два варіанти відтворення ампера у відповідності до його визначення в SI-2019, тобто через фіксацію елементарного заряду:

Опосередковано – через *вольт, ом і закон Ома*. При цьому одиниця напруги вольт, у відповідності до [25, 51], відтворюється за ефектом Джозефсона $U_J = n \frac{h}{2e} f_0 = n f K_J^{-1}$, а одиниця опору ом – за квантовим ефектом Холла $R_H = \frac{h}{me^2} = \frac{1}{m} R_K$, де K_J і R_K – сталі Джозефсона і Клітцинга (докладно ці ефекти розглядаються в розділі 2).

Напряму – методом *одноелектронного тунелювання*.

Розглянемо ці варіанти коротко.

4.3.2.1. Опосередковане відтворення ампера за законом Ома

Відповідно до цього закону, оперуючи “квантовими” напругою і опором, можна записати вираз для “квантового” струму:

$$I = \frac{U_J}{R_H}$$

Підставляючи у цю формулу вирази для U_J і R_H одержуємо

$$I = n K_J^{-1} m R_K^{-1} f = \frac{1}{2} n m e f$$

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 СІ.

В самому загальному вигляді установка для відтворення сили струму складається з джерела (міри) “джозефсонівської” напруги U_J , криогенної міри “холлівського” опору R_H , струмового компаратора і вторинного джерела струму (рис. 4.16).

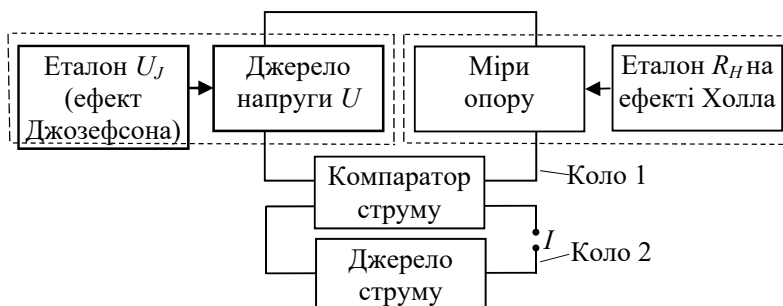


Рис. 4.16. Установа для відтворення «квантового» ампера

У першому колі “народжується” квантовий ампер за виразом $I = \frac{U_J}{R_H}$, далі його розмір за допомогою струмового компаратора передається у друге коло, яке містить високостабільне джерело струму і необхідні органи регулювання вихідного рівня.

Перші реалізації цього методу дозволяли досягти відносної невизначеності відтворення ампера близько 10^{-6} . Надалі були введені суттєві удосконалення в схему цього методу, що дозволило одержати програмоване джерело струму з необхідними метрологічними характеристиками,

Невизначеність відтворення струму таким генератором складає кілька одиниць на 10^{-8} , тобто була знижена на два порядки у порівнянні з першими зразками. Цей квантовий генератор струму знайшов широке використання в метрологічній практиці.

4.3.2.2. Пряме відтворення ампера

Пряме відтворення ампера полягає у використанні метода “одноелектронного” тунелювання (SET) і визначення сили струму за формулою $I = ef_T$, де e – елементарний заряд, f_T – частота тунелювання [25, 32, 51].

Але пряма реалізація ампера виявилась складним завданням, перш за все, через мале значення струму, яке можна одержати цим методом, оскільки e – дуже мала величина, а f_T має свої обмеження. Існують мінімум два ефекти, які суттєво впливають на процес відтворення струму і навіть можуть привести до неможливості SET-тунелювання: *теплові і квантові флуктуації*.

Для їх нейтралізації необхідно виконати такі умови:

1) енергія теплових флуктуацій у пристрої $E_T = kT$ повинна бути значно менше, ніж так звана «кулонівська енергія» $E = e^2/2C$, де C – ємність переходу;

2) ємність переходу повинна бути дуже малою (кілька аФ), тоді виконуються умови “*кулонівської блокади*”, яка забезпечує тунелювання електронів по одному, тобто SET. Кулонівська блокада перешкоджає переходу більш ніж одного електрона (через кулонівське відштовхування) до тих пір, поки електрон не буде видалений (підключенням до зовнішнього кола). При тунелюванні відбувається стрибок електрона з одного електрода SET-транзистора на інший, що викликає перезарядку ємності переходу на значення e і появу напруги $U = e/C$. Далі системі потрібен деякий час, який визначається R і C переходу, щоб відновити заряд до $Q = e/2$, після чого відбудеться черговий перехід. В системі встановлюється режим *когерентних коливань* з частотою $f = I_{ср} / e$. Підсумком сказаного є те, що частота тунелювання (а отже і SET-струм) мають обмеження, пов’язані як з фізикою процесу, так і з конструкцією SET-пристроїв.

Для реалізації цієї технології були розроблені спеціальні SET-транзистори (рис. 4.17, а), а на основі послідовно включених SET- транзисторів – більш досконалі пристрої, так звані SET-насоси (рис. 4.17, б).

Роботи зі створення джерела струму на ефекті одноелектронного тунелювання велись близько двадцяти років у багатьох країнах, Була досягнута частота тунелювання 1000 МГц і струм 160 пА, що дозволяє говорити про створення *квантового еталона струму*. Невизначеність відтворення ампера складає близько кількох одиниць на 10^{-8} .

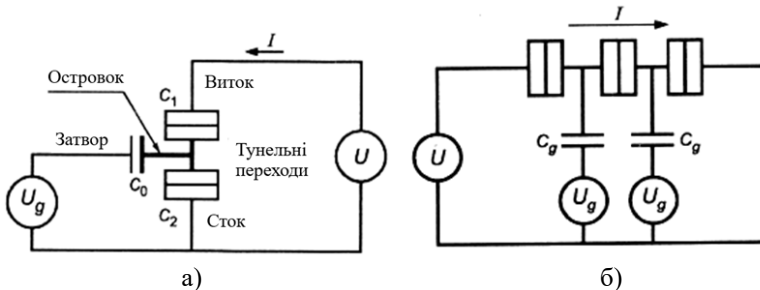


Рис. 4.17. Схеми SET-транзистора а) і SET-насоса б)

4.4. Відтворення кілограма у SI-2019

4.4.1. Коротка історія

При встановленні метричної системи мір у 1795 р. як одиниця маси була прийнята маса 1 кг, що дорівнює масі 1 дм³ чистої води при температурі її найбільшої густини (4 °С). У цей період були проведені точні вимірювання маси відомого обсягу води шляхом послідовного зважування в повітрі і воді порожнього бронзового циліндра, розміри якого були ретельно визначені.

Виготовлений на основі цих зважувань перший прототип кілограма являв собою платинову циліндричну гирю висотою 39 мм, що дорівнює його діаметру. Він був переданий на збереження в Національний Архів Франції (рис. 4.18).

У XIX ст. були зроблені повторні ретельні вимірювання маси 1 дм³ води, при цьому було встановлено, що ця маса приблизно на 0,28 г менше маси прототипу Архіву.

Для того, щоб при подальших, більш точних зважуваннях не змінювати значення одиниці маси, Міжнародною комісією з еталонів метричної системи в 1872 р. було вирішено за одиницю маси прийняти масу прототипу кілограма Архіву. Він одержав назву International Prototype Kg (ІПК)

У 1883 р. були виготовлені 42 прототипи кілограма з платино-іридієвого сплаву із 90% платини і 10% іридію) фірмою “Джонсон, Маттей і К^о”. Копії №12 і №26 були отримані за жеребкуванням Росією в 1889 р. відповідно до Метрич-



Рис. 4.18. Прототип кілограма, що зберігається в Архіві Франції

ної конвенції. Копія №12 стала державним еталоном Російської імперії. Еталон зберігається на кварцовій підставці під двома скляними ковпаками в сталевій шафі особливого сейфа, що знаходиться в термостатованому приміщенні.

Більшість країн створили свої національні еталони-артефакти кілограма, типова структура еталона кілограма включає до себе такі системи:

- систему відтворення одиниці маси (набір еталонних гир);
- апаратуру для передавання розміру одиниці (компаратори маси);
- систему визначення параметрів, що впливають на результат вимірювання маси (параметрів довколишнього середовища, магнітної проникності, густини матеріалу і об'єму гир, тощо);
- системи живлення і забезпечення особливих умов зберігання і застосування еталона.

Єдність вимірювання маси при такому визначенні кілограма підтримується досить громіздкою системою простежуваності до ІРК, яка включає різноманітні процедури звірень і калібрувань. Ця система існує більше ста років, вона офіційно діяла до 2019 року.

При введенні метричної системи було сформульовано вимогу до неї щодо опори на “прототипи, взяті з природи”. Але на практиці реалізувати цю вимогу виявилось нелегко.

В XIX сторіччі були проведені численні експерименти з реалізації цього визначення, але кожне нове вимірювання давало різний результат. Посилення контролю за умовами вимірювань, урахування все нових і нових джерел похибок заводили у глухий кут. Тому вже на 3-й CGPM (1901 р.) було зроблено уточнення, що кілограм є одиницею маси, яка дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма – платино-іридієвої гирі, виготовленої ще в 1799 р. ІРК не є природним прототипом, це артефакт, тобто унікальний витвір рук людини.

Величезний недолік цього визначення кілограма полягав в тому, що маса артефакту через його походження не могла бути абсолютно стабільною, і його властивості з часом тією чи іншою мірою змінювались. Крім того, артефакти-еталони не можуть бути доступні повсюдно в будь-який час і будь-якому місці, а застосовуються лише для звірення в тій лабораторії, де вони зберігаються.

Результати звірень офіційних копій та ІРК свідчать про наявність деяких розбіжностей між ними і їх залежність у часі. Зміни становили 50 мкг відносно ІРК з часу першої повірки, яка відбулась понад 100 років тому. Дрейф маси самого ІРК з 1889 р. не може бути проконтрольовано, проте він існує і може бути визначений тільки за допомогою абсолютних експериментів, які дотепер неможливі через необхідність забезпечення високої точності вимірювань. Великий недолік існуювавшего визначення кілограма полягав також у тому, що невідома величина дрейфу ІРК також впливає на інші одиниці, тому що за діючими на той час визначеннями ампер, моль і кандела залежали від кілограма. Тому вже багато років провідні НМІ вели роботи з пошуку шляхів побудови природного еталона кілограма.

На 21-й CGPM (1999 р.) було рекомендовано, щоб “зусилля із поліпшення експериментів, пов’язаних із визначенням маси через фундаментальні константи, тривали і надалі, маючи за мету майбутнє відтворення кілограма за допомогою квантових ефектів. Подальше перевизначення для забезпечення безперервності значення маси має бути узгоджено в значеннях декількох одиниць на 10^{-8} із попереднім визначенням”.

Пошук привів до *квантових технологій*.

Ці дослідження тривали більше 20 років і були успішними, вони дозволили пов’язати одиницю маси зі сталою Планка. На сьогодні, згідно рішення 26-ї CGPM, прийнято таке визначення:

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

На цей час існують дві незалежні технології, за допомогою яких можна реалізувати нове визначення кілограма. Перша з них ґрунтується на визначенні електричної потужності (за допомогою квантових методів Джозефсона і Холла) і порівнянні її з механічною (куди входить невідома маса), застосовуючи спеціально для цього розроблені електромеханічні ваги (“електричний” кілограм).

У другій технології невідома маса визначається через масу одного атома конкретного ізотопу, яка є добре відомою через h , c і $\Delta\nu_{cs}$ і обчислення кількості атомів в одному кристалі (“атомний” кілограм).

4.4.2. Реалізація “електричного” кілограма

Оскільки у першому методі кілограм відтворюється через вимірювання електричних величин, він одержав умовну назву “електричного кілограма”. Для вимірювання електричної напруги і струму використовуються квантові ефекти Джозефсона і Холла, суть яких розглядається нижче [25, 26, 43].

Але не менш важливою складовою методу є високоточне порівняння електричних і механічних потужностей. Прецизійний засіб для виконання цієї операції був відомий як ват-ваги, а віднедавна – як ваги Кіббла¹. Ваги Кіббла можуть бути розроблені з різними геометричними параметрами й функціонувати за різними експериментальними процедурами. Суть методу полягає в наступному (рис. 4.19).

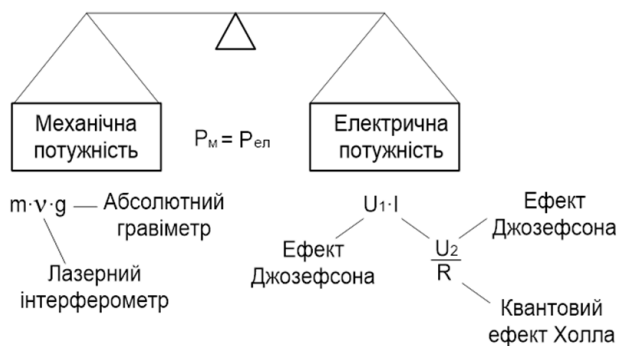


Рис. 4.19. Принцип роботи ват-ваг

В ході двохетапного експерименту порівнюються механічна і електричні потужності (віртуальні):

$$mvg = VI.$$

Ліва частина цього рівняння – механічна потужність, а права частина рівняння – електрична потужність. Обидві потужності вимірюються у ватах, звідси і назва установки – “ват-ваги”.

¹ Ми називасмо ват-ваги “вагами Кіббла” для того, щоб віддати належне доктору Брауну Кіббл, якому належав первісний задум ідеї цього експерименту.

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_j (ефект Джозефсона) і електричний опір R_H (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 Джозефсона, C_{el} – стала ват-ваг.

В еталонних установках, що діють у національних метрологічних інститутах США і Великої Британії, наразі заявлена невизначеність відтворення “електричного” кілограма кілька одиниць на 10^{-8} .

Наведемо цю процедуру докладніше.

Визначення невідомої маси m_x артефакту x здійснюється у двох режимах: режимі зважування й режимі руху. Вони можуть відбуватися послідовно або одночасно. **У режимі зважування** вага¹ $m_x g$ артефакту врівноважується електромагнітною силою, що діє, наприклад, на кільцеву котушку з довжиною дроту L , занурену в радіальне магнітне поле індукції B , коли струм I_1 протікає через котушку. Геометричні параметри магніту й котушки призначено для створення сили, що паралельна місцевому гравітаційному прискоренню. Прискорення сили тяжіння g , що діє на масу, та струм I_1 , який протікає в котушці, вимірюються одночасно так, що:

$$m_x g = I_1 B L.$$

У режимі руху напруга V_2 , що індукується на клеммах тієї ж котушки, яка рухається вертикально зі швидкістю v через те саме магнітне поле індукції, вимірюється так, що:

$$V_2 = v B L.$$

Рівняння, що описують два режими, об’єднуються внаслідок скорочення BL :

$$m_x g v = I_1 V_2.$$

¹ У законодавчій метрології “вага” може відноситися до матеріального об’єкта або сили тяжіння. Терміни “сила ваги” й “гіря” застосовуються в законодавчій метрології, якщо значення “ваги” незрозуміло з контексту.

Отже, потужність, що має механічний характер, прирівнюється до потужності, яка має електромагнітний характер. У цьому методі потужності є явно “віртуальними”, тому що потужність не фігурує в жодному з режимів цього дворежимного експерименту.

Струм I_1 може бути визначено, наприклад, застосувавши закон Ома, вимірявши падіння напруги V_1 на клемх сталого резистора зі значенням R . Обидві напруги, V_1 і V_2 , вимірюються через сталу Джозефсона, K_J , що приймається рівною $K_J = 2e/h$, де e – елементарний заряд. Аналогічно, R вимірюється через сталу Клітцинга R_K , що приймається рівною $R_K = h/e^2$. Величини v і g вимірюються у відповідних одиницях системи SI, $m \cdot s^{-1}$ і $m \cdot s^{-2}$. Слід зазначити, що вираз $K_J^2 R_K = 4/h$ дозволяє схематично переписати останнє рівняння у такому вигляді:

$$m_x = h \left(\frac{bf^2}{4} \right) \frac{1}{gv},$$

де f – це експериментальна частота, b – безрозмірна експериментальна величина, обидві пов’язані з необхідними вимірюваннями електричного струму й напруги.

Окрім ваг Кіббля існують й інші електромагнітні та електростатичні реалізації, як, наприклад, *джоуль-ваги* і *вольт-ваги*, що також можуть бути використані.

4.4.3. Реалізація “атомного” кілограма (метод “рентгенівської густини кристала”)

Концепція методу рентгенівської густини кристала (XRCD) походить від класичної ідеї щодо того, що масу чистої речовини може бути виражено через кількість структурних одиниць у речовині [25, 43]. Таку кількість може бути виміряно за допомогою технології XRCD, в якому об’єм елементарної комірки й майже ідеального кристала визначається, наприклад, вимірюванням параметра ґратки a й середнього діаметра сферичного зразка. Найчастіше в цьому методі застосовуються монокристали кремнію, оскільки з нього можна отримати крупні кристали, що мають високу хімічну чистоту і в яких відсутні дислокації. Це досягається за допомогою технологій росту кристалів, розроблених для

напівпровідникової промисловості. Макроскопічний об'єм V_s одного кристала дорівнює середньому мікроскопічному об'єму атома в елементарній комірці, помноженому на кількість атомів у кристалі. Припустимо, що кристал містить тільки ізотоп ^{28}Si . Отже, кількість атомів N у макроскопічному кристалі задається таким рівнянням:

$$N = 8V_s/a(^{28}\text{Si})^3$$

де 8 – це кількість атомів в елементарній комірці кристалічного кремнію, $a(^{28}\text{Si})^3$ – об'єм елементарної комірки, що являє собою куб; тобто $V_s/a(^{28}\text{Si})^3$ – це кількість елементарних комірок у кристалі, й кожна елементарна комірка містить вісім атомів кремнію-28. Оскільки об'єм будь-якого твердого тіла залежить від температури й меншою мірою від гідростатичного тиску, V_s і $a(^{28}\text{Si})^3$ приписуються ті самі вихідні умови. З практичних міркувань кристал було виготовлено у формі сфери з масою приблизно 1 kg.

Для реалізації визначення кілограма масу m_s сфери спочатку було виражено через масу одного атома методом XRCD¹:

$$m_s = Nm(^{28}\text{Si})$$

а оскільки експериментальне значення фізичної сталої $h/m(^{28}\text{Si})$ відоме з високою точністю, можна переписати цей вираз як:

$$m_s = hN \left(\frac{m(^{28}\text{Si})}{h} \right)$$

Експеримент XRCD визначає N ; $m(^{28}\text{Si})/h$ – це природна стала, значення якої відомо з високою точністю, і, звичайно, чисельне значення h наразі є точно визначеним.

Сфера є первинним еталоном одиниці маси, й одиниця маси – кілограм – поширюється за допомогою цього еталона.

4.4.4. Роль і статус міжнародного прототипу

В *Mise en pratique* з перевизначення кілограма [43] підкреслюється, що “наступні зміни маси ІПК можуть являти собою історичний інтерес,

¹XRCD – метод рентгенівської кристалічної щільності (X-ray crystal density).

навіть якщо ІРК більше не зберігатиме особливий статус або спеціально призначену роль. Слідкуючи за зміною маси ІРК протягом довгого часу, можна впевнитися у стабільності його маси відносно фундаментальних сталих, що вже давно є темою для обговорення. Із цієї причини ІРК і його шестеро офіційних копій зберігаються у ВІРМ на тих же умовах, на яких вони знаходилися до перевизначення”.

4.4.5. Вплив перевизначення кілограма на похідні одиниці

4.4.5.1. Вплив на похідні одиниці в механіці

Найважливіші похідні величини і одиниці механіки наведено в табл. 4.2.

Наведемо цитату з *Mise en pratique* щодо відтворення кілограма у Новій SI: “Резолюції CGPM (щодо перевизначення кілограма – ред.) не торкнулася ні реалізацій метра, ні секунди. Це означає, що для будь-

Таблиця 4.2

Найважливіші похідні величини і одиниці механіки

Величина			Одиниця		
Назва	Позначення	Розмірність	Назва	Позначення	
				Укр.	Міжнар.
Густина, щільність	ρ	$L^{-3}M$	Кілограм на кубічний метр	кг/м ³	kg/m ³
Питомий об’єм	v	L^3M^{-1}	Кубічний метр на кілограм	м ³ /кг	m ³ /kg
Імпульс, кількість руху	p	$LM T^{-1}$	Кілограм-метр за секунду	кг·м/с	kg m/s
Сила	F	$LM T^{-2}$	Ньютон	Н	N
Імпульс сили	I	$LM T^{-1}$	Ньютон-секунда	НЧ	NЧ
Питома вага	γ	$L^{-2}MT^{-2}$	Ньютон на кубічний метр	Н/м ³	N/m ³
Момент сили	M	L^2MT^{-2}	Ньютон-метр	НЧ	NЧ
Тиск	p	$L^{-1}MT^{-2}$	Паскаль	Па	Pa
Енергія	E	L^3MT^{-2}	Джоуль	Дж	J
Робота	W	L^3MT^{-2}	Джоуль	Дж	J
Потужність	P	L^2MT^{-3}	Ват	Вт	W
Масова витрата	g_m	MT^{-1}	Кілограм за секунду	кг/с	kg/s

яких когерентних похідних одиниць механіки, виражених у термінах основних одиниць, як $\text{кг}\cdot\text{м}^p\cdot\text{с}^q$ (де p і q – цілі числа), єдина зміна в простежуваності до системи SI відбувається в простежуваності до кілограма”, і це було описано вище.

Приклади величин та пов’язаних з ними когерентних похідних одиниць наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3
Деякі величини, когерентна одиниця системи SI яких виражається в $\text{кг}\cdot\text{м}^p\cdot\text{с}^q$

Показник ступеня	p	q
Густина маси	-3	0
Густина поверхні	-2	0
Напруга, тиск	-1	-2
Імпульс	1	-1
Сила	1	-2
Момент імпульсу	2	-1
Енергія, робота, крутильний момент	2	-2
Потужність	2	-3

Іншими словами, ніяких змін щодо простежуваності похідних одиниць до еталонів метра і секунди (і відповідних сталих) не відбудеться, а простежуваність до ІРК зміниться простежуваністю до сталої Планка (рис. 4.19).

4.4.5.2. Вплив на одиниці в інших видах вимірювань

Ампер був раніше визначений через секунду, метр і кілограм, а також через надання фіксованого числового значення магнітній сталій μ_0 . Ампер у Новій SI визначається через секунду і фіксоване числове значення елементарного заряду e . Той факт, що стала Планка буде мати фіксоване числове значення, є **дуже корисним** для електричної метрології, оскільки ця стала входить у вирази для визначення напруги і опору з використанням квантових ефектів, а також у вирази для визначення інших електричних одиниць [51].

Кельвін у Новій SI визначається через точне значення сталої Больцмана k , тому перевизначення кілограма *не має ніякого практичного впливу* на цю зміну [43].

Також перевизначення кілограма не має ніякого практичного впливу на реалізацію *кандели*.

4.5. Кельвін

4.5.1. Коротка історія

Одиниця температури пройшла значну історію, яка докладно викладена в ряді джерел. У 1954 р. 10-та CGPM прийняла рішення щодо визначення термодинамічної температурної шкали через *потрійну точку води* як фундаментальну реперну точку, температура якої дорівнює точно 273,16 кельвіна.

З 1960 р. (з уточненням МКМВ 1967 р.) за **одиночку термодинамічної температури прийнято кельвін – $1/273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води**. Припустимим є вираження термодинамічної температури в градусах Цельсія.

Відтворення *термодинамічної шкали* температур пов'язане зі значними труднощами. Тому у 1927 р. була встановлена *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 і кипіння). У цих точках температура речовини залишається постійною увесь час, поки здійснюється перехід.

Температура в реперних точках визначається *первинним термометром*, що використовує співвідношення між об'ємом, тиском і температурою ідеального газу.

Уточнимо поняття термодинамічної і практичної температурних шкал. *Термодинамічна шкала* – це шкала, яка не залежить від виду термометричної речовини і базується на законах термодинаміки та властивостях ідеальної теплової машини, яка функціонує за циклом Карно.

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. Ця шкала час від часу уточнюється. Перша міжнародна практична температурна шкала була введена у 1927 р. на VII ГКМВ (МТШ–1927). Вона регламентувала опорні точки, методи і засоби їх інтерполяції і вимірювання температури.

Ця шкала була замінена у 1948 р. на МПТШ–48, яка мала цілий ряд відмін від МТШ–27 в частині опорних точок, а також методів і засобів реалізації шкали.

З часом були виявлені суттєві відмінності МПТШ-48 від термодинамічної шкали, особливо в області високих температур, що привело до прийняття у 1968 р МПТШ-68. Крім удосконалення існуючої шкали її діапазон був розширений униз від -183 °C до потрійної точки водню 13,81 К.

З розвитком методів і засобів температурних вимірювань виникла необхідність у подальшому удосконаленні практичної температурної шкали. Так народилась шкала 1990 року, яка одержала назву міжнародної температурної шкали МТШ-90. У 2000 році вона була доповнена тимчасовою низькотемпературною шкалою ТНТШ-2000. Ця шкала діє і в цей час (див. табл. 4.4).

МТШ-90 охоплює область від 0,65 К до найвищої температури, практично доступної вимірюванню відповідно до закону Планка для монохроматичного випромінювання. Порівняно з прямими вимірюваннями термодинамічних температур, вимірювання T_{90} виконуються легше, точніше і з високим ступенем відтворюваності. В діапазоні температур від 0,65 К до 1357 К для відтворення реперних точок МТШ-90 використовуються методи **контактної термометрії**, на більш високих температурах – методи **оптичної термометрії**.

4.5.2. Система існуючих еталонів одиниці температури України [26, 44]

В Україні створено комплекс первинних еталонів одиниці температури на основі **контактної термометрії** (від 13,880 до 273,16 К;

Таблиця 4.4

Основні реперні точки МТШ-90

Номер реперної точки	Температура		Речовина	Тип точки
	T_{90}, K	$t_{90}, \text{°C}$		
1	від 3 до 5	від -270,15 до -268,15	He	P
2	13,8033	-259,3467	p-H ₂	ПТ
3	≈ 17	≈ -256,15	p-H ₂ (або He)	P (або Г)
4	≈ 203	≈ -252,85	p-H ₂ (або He)	P (або Г)
5	24,5561	-248,5939	Ne	ТР
6	54,3584	-218,7916	O ₂	ТР
7	83,8058	-189,3442	Ar	ТР
8	234,3156	-38,8344	Hg	ТР
9	273,16	0,01	H ₂ O	ТР
10	302,9146	29,7646	Ga	П
11	429,7485	156,5985	In	ТТ
12	505,078	231,928	Sn	ТТ
13	692,677	419,527	Zn	ТТ
14	933,473	660,323	Al	ТТ
15	1234,93	961,78	Ag	ТТ
16	1337,33	1064,18	Au	ТТ
17	1357,77	1084,62	Cu	ТТ

Примітка 1. Ізотопний склад речовин відповідає природному, за винятком ³He; символ p-H₂ означає рівноважний склад молекулярних модифікацій орто- і параводню.

Примітка 2. Умовні позначення: – тиск насиченої пари; ТР – потрійна точка (температура рівноваги між твердою, рідкою фазами і парою); Г – газовий Р термометр; П і ТТ – точки плавлення і тверднення відповідно (температура рівноваги рідкої і твердої фаз за тиску 101325 Па).

від 273,16 до 1357,77 К), який повністю відповідає вимогам реалізації МТШ-90. Ще два первинних еталона (від 1357,77 до 2800 К; і від 292,67 до 1234,93 К) ґрунтуються на вимірюванні температури *за випромінюванням* (рис. 4.20).

За своїми метрологічними характеристиками еталони України знаходяться на рівні еталонів розвинених країн. Але чи можна їх вважати первинними після введення SI-2019 ?

4. Еталони основних одиниць SI

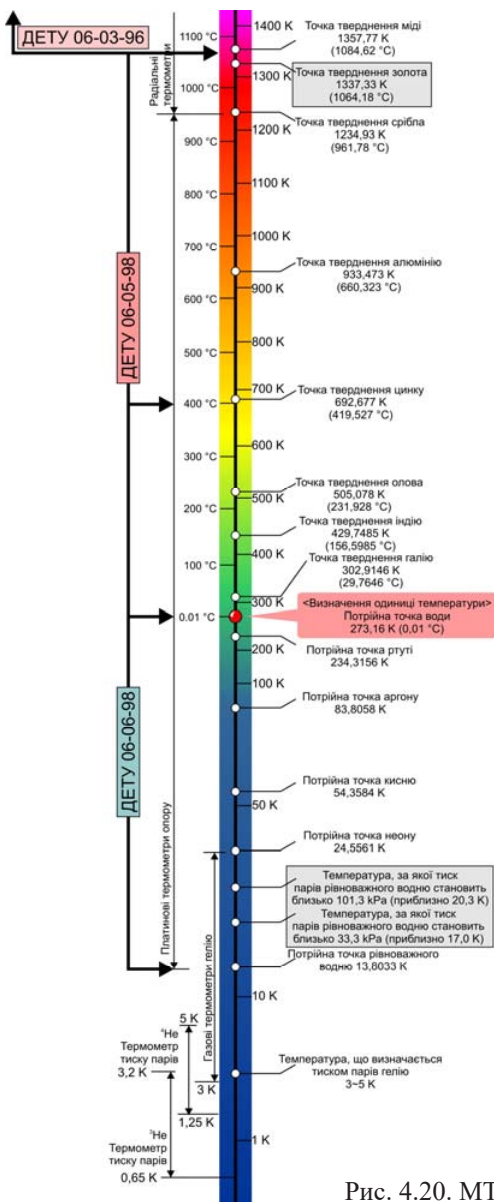


Рис. 4.20. МТШ-90

4.5.3. Перевизначення кельвіна

Визначення кельвіна як $1/273,16$ частки температури потрійної точки води (ПТВ) забезпечувало адекватність відтворення температури вже понад 50 років. Але ряд причин призвели до ситуації, коли це визначення стало обмежувати точність вимірювання температури.

Крім цього, визначення кельвіна через ПТВ належить до артефакту – посудини для реалізації потрійної точки води, властивості якої залежать від цілої низки параметрів, у тому числі хімічного складу матеріалу посудини і варіацій ізотопного складу води.

CIPM, маючи довгострокову мету визначення всіх основних одиниць SI через ФФС, щоб виключити залежність від властивостей будь-яких артефактів або матеріалів і забезпечити тривалу стабільність одиниць, у 2011 р. запропонував нове визначення одиниці температури кельвіна через *сталу Больцмана k* .

Нове визначення, як вже відзначалося, пов'язує значення одиниці температури – кельвіна зі значенням одиниці енергії – джоулем ($1 \text{ Дж} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$) – і не залежить від будь-якої конкретної температури.

Консультативний комітет з термометрії при МБМВ у МеР сформулював поняття первинної термометрії для відтворення кельвіна за визначенням в SI-2019 [45]:

“Первинна термометрія дає змогу вимірювати термодинамічну температуру, застосовуючи термометр на основі добре зрозумілої фізичної системи, для якої можна чітко і ясно, без жодних невідомих або значно залежних від температури сталих, виразити рівняння стану, що описує співвідношення між термодинамічною температурою T та іншими незалежними величинами, такими як закон ідеального газу або рівняння Планка. Значення термодинамічної температури можна отримати, вимірявши незалежні величини. Для отримання точних значень термодинамічної температури необхідно не тільки проведення точних вимірювань незалежних величин, але й достатнє розуміння вищезгаданої системи для надання кількісної оцінки відхилень від ідеальної моделі для внесення відповідних поправок”.

4.5.4. Методи первинної термометрії

МеР визначив методи *первинної термометрії*, за допомогою яких, знаючи сталу Больцмана, можна вимірювати T [44]. Це такі методи: 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. 4.21).

Оскільки безпосереднє вимірювання енергії макроскопічної системи неможливе, всі ці методи вимірюють її опосередковано. Так, наприклад, методи газової термометрії засновані на визначенні енергії газу шляхом вимірювань пов'язаних із нею температурно-залежних параметрів, таких, як: швидкість звуку в газі, його тиску, діелектричної проникності і показника заломлення. Радіаційна термометрія базується на зв'язку інтегральної яскравості повного випромінювання абсолютно чорного тіла або його спектральної яскравості з термодинамічною температурою. Шумова термометрія використовує температурну залежність теплового руху носіїв заряду в резисторі.

Роботи з первинної термометрії активно проводяться в ряді національних метрологічних інститутів світу. На цей час найкращі результати одержано за допомогою методів акустичної газової термометрії та газової термометрії за діелектричною проникністю

Згідно визначенню термодинамічної температури, для її вимірювання необхідно використовувати цикл Карно, при цьому вимірювання температури полягає в вимірюванні кількості теплоти. Однак на цьому шляху неможливо досягти задовільної точності. Більш точним є вимірювання термодинамічної температури за допомогою газових термометрів, що допустимо через еквівалентність термодинамічної і газотермометричної температур.

Як відомо, газотермометрична температура визначається з рівняння стану, яке для ідеального газу має вигляд:

$$PV_m = RT,$$

де V_m – молярний об'єм газу; R – універсальна газова стала; P – тиск.

Для реального газу, для врахування його відмінності від ідеального, рівняння стану подається у вигляді ряду:

$$PV_m \left[1 + \frac{B(T)}{V_m} + \frac{C(T)}{V_m} + \dots \right],$$

де $B(T)$, $C(T)$ – віртуальні коефіцієнти, що є функціями від температури. Розглянемо газотермометричні вимірювання докладніше.

Газотермометричні вимірювання

Газотермометрична температура визначається за допомогою газового термометра. Останній в спрощеному вигляді уявляє собою посудину, в якій знаходиться газ (як правило азот, аргон або гелій, термічні властивості яких добре відомі), і яка має постійну відому масу (або, що те ж саме, постійну кількість молей). Стан газу змінюється. У відповідності до рівняння стану зміна температури викликає зміну тиску та/або об'єму, через що і визначається температура.

Основні види газових термометрів наведені на рис. 4.21.

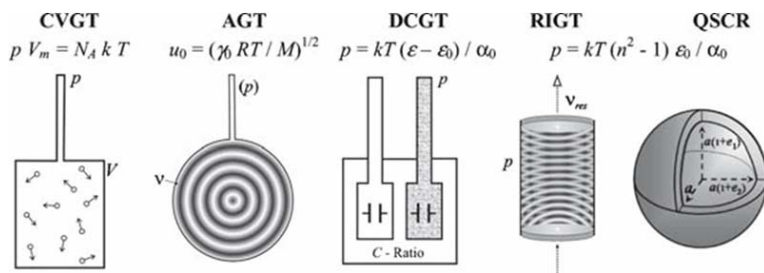


Рис. 4.21. Види газових термометрів:

CVGT – газовий термометр сталого об'єму; AGT – акустичний газовий термометр; DCGT – газовий термометр діелектричної (сталой) проникності; RIGT – газовий термометр за показником заломлення;

QSCR – термометр на основі квазісферичного резонатора

Інші первинні методи

До первинних методів термометрії відносяться також:

- шумова термометрія;

- термометрія за доплеровським розширенням спектральної лінії;
- спектральна радіаційна термометрія.

Наведемо найбільш перспективні методи первинної термометрії і досягнуті з їх допомогою мінімальні невизначеності (табл. 4.5) [25, 44, 45].

Таблиця 4.5

Найбільш перспективні методи первинної термометрії

Вихідний метод (засіб)	Рівняння вимірювань	Відносна стандартна невизначеність
Акустичний газовий термометр	$V_o = \sqrt{\frac{y_o RT}{M}}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$
Термометр за діелектричною проникністю	$P = kT \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_o}{\alpha_o}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Газовий термометр за показником заломлення	$P = kT \frac{(n^2 - 1)\varepsilon_o}{\alpha_o}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Шумовий термометр	$\langle V^2 \rangle = 4kTR\Delta f$	$5 \cdot 10^{-6}$
Доплерівський термометр	$\Delta v_D = \sqrt{\frac{2kT}{mC_o^2}} v_o$	$10 \cdot 10^{-6}$

В формулах табл. 4.5 використано такі позначення: V_o – швидкість звуку; $y_o = C_p/C_v$ – відношення питомих теплоємностей; M – молярна маса газу; ε – діелектрична стала; ε_o – електрична стала; α_o – коефіцієнт електричної поляризації; n – показник заломлення; $\langle V^2 \rangle$ – середньоквадратичне значення напруги шуму; R – електричний опір; Δv_D – доплеровське розширення спектральної лінії з частотою v_o ; m – атомна маса; c_o – швидкість світла у вакуумі.

Акустичний газовий термометр

В газі ряд величин залежить від температури, зокрема швидкість звуку. При вимірюванні в NIST швидкість звуку V_o в інертному газі аргоні

визначалась за допомогою сферичного резонатора при температурі потрійної точки води, а T розраховувалась за формулою з табл. 4.5. Швидкість звуку одержувалась через резонансні частоти ν і об'єм резонатора. Вплив тиску P є другорядним. Джерелами похибок є чистота вимірювального газу, залежність молярної маси від ізотопного складу, екстраполяція до нульового тиску, а також розташування акустичних датчиків.

Газовий термометр за діелектричною сталю

Визначення температури через діелектричну сталю давно використовується в низькотемпературній термометрії.

Для ідеального газу діелектрична стала має вигляд $\epsilon = \epsilon_0 + \alpha_0 \frac{N}{V}$, де $\frac{N}{V}$ – щільність кількості (густина) частинок. Якщо поєднати цей вираз з рівнянням стану, одержимо зв'язок поміж P і ϵ , наведений в табл. 4.5. Прогрес, досягнутий в поляризації гелію в останні роки, забезпечив конкурентноспроможність цього методу. Для вимірювання ϵ вимірювальний газ подається у відповідні конденсатори. Через низьку поляризацію гелію абсолютні вимірювання неможливі. Тому вимірювальний конденсатор по чергово то заповнюється гелієм, то відкачується, а ϵ одержують через відносну зміну ємності.

Значним джерелом невизначеності при використанні цього методу є деформація вимірювального конденсатора через тиск газу. Також важливо точно вимірювати тиск і ємність. Ретельно організований експеримент дозволяє очікувати невизначеність на рівні $2 \cdot 10^{-6}$, що підтверджено результатом вимірювань в діапазоні низьких температур від 2,5 до 36К, а також в потрійній точці води.

Термометрія за доплерівським розширенням лінії

Цей метод використовує лазерну спектроскопію Він ґрунтується на вимірюванні доплерівського розширення лінії поглинання частинок газу, що рухаються в ампулі з однорідною температурою. Інформацію про температуру містить ширина смуги поглинання, яка сканується за допомогою лазера (рис. 4.22).

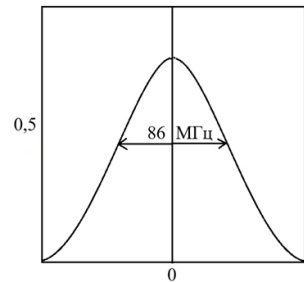


Рис. 4.22. Ширина смуги поглинання

В Парижі були проведені експерименти з CO₂-лазером на лінії аміаку при частоті 30 ТГц, одержана при цьому невизначеність вимірювання складала приблизно $3,5 \cdot 10^{-5}$. Аналогічні експерименти були проведені в Італії і Данії. Але великі проблеми, пов'язані з розділенням доплерівського розширення і розширення, пов'язаного з іншими причинами, зокрема через взаємодію частинок, не обіцяють зниження невизначеності менше $1 \cdot 10^{-5}$.

Шумова термометрія

Температура об'єкту може бути визначена шляхом спостереження статистичних або квантових явищ. Вимірювання теплових шумів використовуються в термометрії на протязі багатьох років. Температура при цьому визначається через середньоквадратичне значення напруги шумів на електричному опорі за формулою Найквіста (табл. 4.5).

До цього часу шумова термометрія активно використовувалась при дуже низьких і дуже високих температурах. Поблизу потрібної точки води повинні використовуватись спеціальні електронні схеми, наприклад, цифрові корелятори, а також спеціальні пристрої для стабілізації і контролю підсилення і смуги частот, дрейфу і шумів детектора. Основною проблемою є дуже великий час проведення вимірювань для досягнення малої невизначеності, який досягає кількох тижнів.

Роботи з первинної термометрії особливо активізувались з 2005 р., коли було прийнято рішення про підготовку до нових визначень ампера, кілограма, кельвіна і моля. Одним із найбільш поширених став метод “шуму Джонсона”, тому розглянемо його докладніше.

4.5.5. Шумова термометрія (термометрія «шуму Джонсона»)

Вимірювання теплових шумів використовуються в термометрії на протязі багатьох років. Температура при цьому визначається через середньоквадратичне значення напруги шумів у заданій смузі частот на електричному опорі за формулою Найквіста.

$$\langle V^2 \rangle = 4kTR\Delta f.$$

До цього часу шумова термометрія активно використовувалась при дуже низьких і дуже високих температурах. Основною проблемою є

дуже великий час проведення вимірювань для досягнення малої невизначеності, який досягає кількох днів і навіть тижнів.

Принципи первинної термометрії шуму Джонсона [45]

Первинна термометрія шуму Джонсона (JNT) ґрунтується на теплових коливаннях носіїв заряду всередині електричного провідника та флуктуативно-дисипативній теоремі, що є теоретичним описом методів JNT.

Спектральна густина потужності $S_V(f, T)$ шумової напруги V через складний електричний імпеданс $Z(f)$ задається виразом

$$S_V(f, T) = 4hf \operatorname{Re}(Z(f)) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\exp(hf / kT)} \right],$$

де f – це частота, T – термодинамічна температура, h – стала Планка, k – стала Больцмана, а Re означає реальну частинку. Імпеданс може бути заданий, але не обов’язково, резистором з опором $\operatorname{Re}[Z(f)] = R$. Нехтуючи квантовими поправками для $hf \ll kT$, одержуємо формулу Найквіста

$$\langle V^2 \rangle = 4kTR\Delta f,$$

де Δf – це смуга пропускання, в якій вимірюється шумова напруга.

Абсолютна первинна низькотемпературна шумова термометрія (нижче 4 К) [45]

Абсолютна термометрія дає змогу вимірювати термодинамічну температуру безпосередньо через визначення основної одиниці кельвіна, тобто через визначене чисельне значення сталої Больцмана, не посилаючись на жодну реперну точку температури; усі інші параметри, зазначені в рівнянні стану, вимірюються або визначаються іншим способом.

Абсолютна первинна JNT при низьких температурах вимагає вимірювання спектральної густини потужності на джерелі шуму з точно відомим імпедансом $Z(f)$. Відносні сумарні стандартні невизначеності складає значення порядку 1×10^{-3} .

Абсолютна первинна шумова термометрія (вище 1 К) [45]

При абсолютній *термометрії* спектральна густина потужності виводиться з вимірювань середньоквадратичної шумової напруги (або струму) у необхідній смузі пропускання, і з вимірювань *опору*. Неідеальні властивості реальних резисторів та з'єднувальних проводів, що залежить від частоти, можуть ураховуватися із застосуванням моделі, або з використанням кореляційного метода.

Абсолютні вимірювання методом первинної JNT були проведені в NIST при температурі потрійної точки води з відносними невизначеностями порядку 4×10^{-6} . Вимірювання проводилися шляхом звірення потужності теплового шуму з потужністю шуму еталонного сигналу.

В NIST для цього було використано Джозефсонівські еталони змінного струму як квантові джерела псевдовипадкового шуму. В цьому експерименті було досягнуто невизначеності на рівні $(1-2) \cdot 10^{-6}$, що є дуже високим результатом.

4.5.6. Наслідки перевизначення кельвіна. Статус МТШ-90

Очікується, що нове визначення кельвіна буде мати малий безпосередній вплив на статус МТШ-90. Проте, МТШ-90 більше не буде *єдиною практичною основою* для температурних вимірювань.

Так, більшість безпосередніх і корисних наслідків зміни очікується для температур нижче 20 К і вище 1300 К, де первинні термометри можуть забезпечити користувачам менші невизначеності, ніж це можливо за МТШ-90. Проте, МТШ-90 буде залишатися для використання в передбачуваному майбутньому як шкала, що точно і зручно відтворюється і має добре наближення до термодинамічної шкали температур.

Потрійна точка води буде продовжувати грати важливу роль в практичній термометрії.

Прогнозується, що нове визначення буде стимулювати подальше удосконалення первинних термометрів з точки зору як конструкції, так і точності, і поступово вони замінять МТШ-90.

Перевизначення кельвіна, що відбулося у 2019 році, матиме незначний вплив на повсякденне життя, але надаватиме важливі переваги в довгостроковій перспективі.

4.6. Кандела

4.6.1. Коротка історія

Історія величин і одиниць для оптичних вимірювань починається з ХІХ століття, коли полум'я свічки (the candle) було використано як одиницю сили світла, яку і було названо „свічкою”. З часом техніка відтворення світлових величин удосконалювалась. Відомо багато конструкцій світлових еталонів, розроблених в різних країнах.

Сила світла всіх “полум'яних” еталонів у значній мірі залежала від чистоти палива, частки вуглекислоти в ньому і ряду інших факторів. Урахування всіх цих умов дуже ускладнювало оцінку точності відтворення прийнятих світлових величин.

Більш перспективними виявились еталони, випромінюючим елементом яких було розжарене до високої температури тверде тіло. Але і ці еталони за абсолютним розміром одиниці сили світла відрізнялися один від одного.

В 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. Обґрунтуванням для вибору “чорного тіла” був ряд його позитивних властивостей як випромінювача. Випромінення чорного тіла залежить тільки від температури його нагріву і діаметра випромінюючого отвору і не залежить від матеріалу, із якого його виготовлено. При визначеній температурі воно має постійну і відому спектральну характеристику розподілу енергії у відповідності до закону Планка.

В 1930 р. Консультативний комітет з електрики і фотометрії при СІРМ одержав пропозицію від директора NBS (США) створити первинний світловий еталон на основі чорного тіла, Такий еталон було створено. Консультативний комітет з електрики і фотометрії у 1930 р. визнав виготовлення чорного тіла за певною специфікацією прийнятним, і з 1931 р. цей метод став загальноновизнаним. В 1948 р. на Генеральній конференції з мір та ваг було прийнято нову назву для одиниці сили світла – *кандела*. В 1967 р. Генеральна конференція прийняла таке визначення кандели:

“Кандела є сила світла в перпендикулярному напрямку до поверхні в 1/600000 квадратного метра чорного тіла (повного випромінювача) при температурі тверднення платини при тиску в 101325 ньютонів на квадратний метр”.

Хоча це визначення зіграло свою роль для встановлення єдності фотометричних вимірювань у світі, труднощі у виготовленні чорних тіл і підвищенні точності відчувалися і вимагали свого вирішення. Одна із проблем, яка постала в фотометрії, полягала у встановленні прямого зв'язку між світловими і енергетичними величинами.

Світлові або фотометричні величини – це величини, пов'язані з зоровою системою людини і її спектральною чутливістю (світловий потік, сила світла, освітленість тощо), а **енергетичні або радіометричні величини** описують оптичне випромінення в чисто енергетичних поняттях (енергія, потужність, сила випромінення тощо),

Зв'язок між світловими і енергетичними величинами визначається **функцією світлової ефективності** $k_v(\lambda)$:

$$k_v(\lambda) = \frac{\Phi_v(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} = k_m V(\lambda)$$

де $V(\lambda)$ – функція, що описує відносну усереднену спектральну характеристику людського ока (відносну світлову ефективність); k_m – значення максимальної світлової ефективності; $\Phi_v(\lambda)$ – світловий потік у люменах; $\Phi_e(\lambda)$ – потік випромінювання у ватах.

Порівняння енергетичних і фотометричних величин наведено у таблиці 4.6.

Характеристика спектральної чутливості людського ока, тобто залежність спектральної чутливості ока від довжини хвилі світлового випромінення $v(\lambda)$ наведена на рисунку 4.23.

Оскільки еталон кандели базувався на чорному тілі при температурі тверднення платини T_{pt} , невизначеність вимірювання цієї температури призводила до розкиду значення k_m у широких межах від 679,8 до 687,7 лм/Вт. Було проведено багато спроб, щоб визначити константу k_m , яка зв'язує світлові і енергетичні величини [49].

В результаті було встановлено найбільш достовірне значення $k_m = 683$ лм/Вт на довжині хвилі $\lambda_m = 555$ нм (частота $540 \cdot 10^{12}$ Гц) що

Таблиця 4.6

Порівняння енергетичних і фотометричних величин

Енергетичні			Фотометричні		
Величина	Позначення	Одиниця	Величина	Позначення	Одиниця
Енергетична сила світла (сила випромінювання)	I_e	Вт ср^{-1}	Сила світла	J_v	Кандела (кд)
Потужність (потік) випромінювання	Φ_e	Вт	Світловий потік	Φ_v	кд·ср=лм
Енергія випромінювання	Q_e	Вт·с	Світлова енергія	Q_v	лм·с
Енергетична яскравість	L_e	Вт $\text{ср}^{-1}\text{м}^{-2}$	Яскравість	L_v	кд· м^{-2}
Енергетична світність	M_e	Вт м^{-2}	Світність	M_v	лм· м^{-2}
Енергетична освітленість	E_e	Вт м^{-2}	Освітленість	E_v	лм· м^{-2} =лк
Енергетична експозиція	H_e	Вт $\text{м}^{-2}\text{с}$	Світлова експозиція	H_v	лм· $\text{м}^{-2}\text{с}$ =лк·с

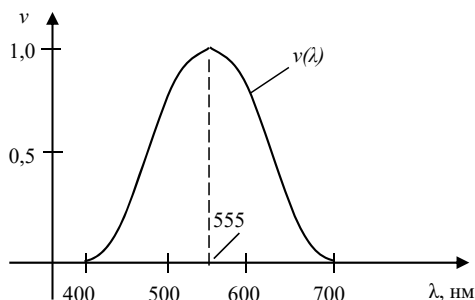


Рис. 4.23. Характеристика спектральної чутливості ока людини

відповідає максимальній чутливості ока. Це дозволило сформулювати нове 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 після тривалого обговорення було прийнято на XVI Генеральній конференції з мір та ваг в 1979 р. і діяло до 2019 року.

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). Використовуючи визначення кандели 1979 р. у Великій Британії був створений еталон на основі приймача, який дозволив знизити похибку відтворення кандели до рівня $1 \cdot 10^{-4}$. 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.

Нове визначення кандели в SI-2019 *не змінило суті цієї одиниці*, тобто і методології її відтворення. Тому і саме ці методи рекомендує МЕР для первинного реалізації кандели в SI-2019.

4.6.2. Реалізація кандели на основі джерела випромінювання

Еталонним і абсолютним є джерело, параметри оптичного випромінювання якого можна визначити на основі вимірювань інших фізичних параметрів. У цьому разі оптичне випромінювання, яке генерується від будь-якого іншого джерела, можна виміряти, безпосередньо звіривши його з таким *абсолютним* джерелом.

Розрізняють два типи джерел, що за певних умов можна вважати абсолютними:

- *випромінювач Планка (чорне тіло)* – резонатор з високим коефіцієнтом випромінювання (дуже близьким до одиниці). Його енергетичну яскравість можна визначити через термодинамічну температуру в порожнині резонатора, застосовуючи закон випромінювання Планка. У цьому разі маємо простежуваність до кельвіна – одиниці температури SI. Для багатьох високоточних застосувань термодинамічну температуру в порожнині встановлюють за допомогою відкаліброваного детектора з фільтром (“фільтрового радіометра”). У цьому разі маємо простежуваність до електричних одиниць системи SI;

- *синхротронне випромінювання*, яке генерує накопичувальне кільце електронів – на круговій орбіті релятивістські електрони ви-

пускають синхротронне випромінювання (SR). За певних умов це джерело можна вважати абсолютним, а спектральну силу випромінювання ($W \cdot rad^{-1}$) SR можна розрахувати за параметрами накопичувального кільця й геометричні параметри, застосовуючи рівняння Швінгера. У цьому разі маємо простежуваність до електричних одиниць системи SI, а також до одиниць вимірювання довжини.

На практиці використовується, як правило, випромінювач Планака.

4.6.3. Реалізація кандели на основі приймача

Еталон може бути реалізовано у трьох варіантах:

1) Приймач-радіометр [45]

Як приймач використовувався прецизійний *радіометр (вимірювач потужності оптичного випромінювання) з електричним заміщенням*. З існуючих радіометрів такого типу найбільш високу точність мають *криогенні радіометри* (невизначеність близько $1 \cdot 10^{-4}$, мінімальна досягнута 10^{-5}). Криогенний радіометр є унікальним приладом, який забезпечує точні вимірювання радіаційних потужностей в широкому спектральному діапазоні, що охоплює ультрафіолетову, видиму і інфрачервону області спектра.

Поява у метрологічній практиці абсолютного криогенного радіометра означала новий рівень точності у радіометричних та фотометричних вимірюваннях, підвищений більше ніж на порядок порівняно з тим, що існував раніше. Криогенний радіометр розглядається зараз як найбільш точний засіб для відтворення радіометричних шкал, він очолює ланцюг простежуваності і утворює абсолютний радіометричний базис. Багато інститутів реалізувало канделу на базі радіометра з електричним заміщенням при кімнатній температурі. Інші фотометричні одиниці, такі як люмен і люкс, виводяться із кандели.

2) Приймач на основі фотодетектора [45]

Другим різновидом приймачів оптичного діапазону є *фотоприймачі (фотометри)*. Ці приймачі побудовані на *фотодетекторах*, що використовують *квантове фізичне явище – фотоефект*, яке полягає в іоніза-

ції атомів і молекул газу під дією світла. В конденсованих тілах (твердих і рідких) розрізняють зовнішній і внутрішній фотоєфекти. **Зовнішній фотоєфект** – вибивання (імітування) електронів речовиною під дією світла. Електрони, що випромінюються при зовнішньому фотоєфекті, носять назву фотоелектронів, а виникаючий струм – фотострумом.

Схему фотоприймача (фотометра) показано на рис. 4.24, його суттєвими складовими є прецизійна діафрагма, фільтр, коригований під $V(\lambda)$ функцію, і фотодетектор.

Як правило, як джерело світла використовується планківське джерело випромінювання при температурі $T = 2858$ К.

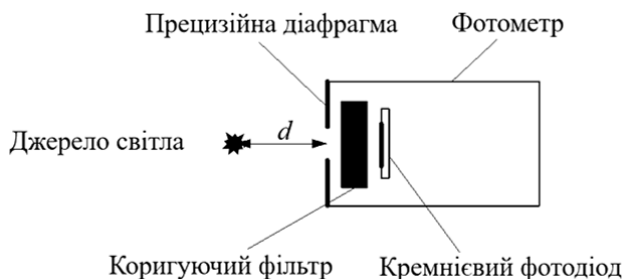


Рис. 4.24. Спрощена схема фотоприймача (фотометра)

Силу світла джерела (в канделах) знаходять за формулою

$$J_v = \frac{d^2}{\Omega_0} \frac{i}{S_\lambda},$$

де d – відстань (в метрах) від джерела світла до площини відліку (поверхні апертури) фотометра; Ω_0 – тілесний кут (в стерadiansах); i – вихідний струм фотометра (в амперах).

Важливою метрологічною характеристикою фотоприймача є **квантова ефективність** – відношення числа фотонів, поглинання яких викликало утворення квазічастинок (електронів), до загального числа поглинутих фотонів (використовується також термін “**коефіцієнт перетворення фотодіодів**”). Квантова ефективність є мірою світлової чутливості і основною характеристикою детекторів фотонів. У приймача, схема якого наведена на рис. 4.24, вона досить обмежена, оскільки

частина світла не поглинається, відбивається і проникає на вихід фотометра. Пошуки більш ефективних рішень привели до створення так званих *трап-детекторів* з квантовою ефективністю, близькою до 100 %.

3) Приймач на основі трап-детектора [46, 48]

Трап-детектор (детектор-пастка) – специфічний фотодетектор, побудований таким чином, щоб поглинути максимум енергії світла і перетворити її в електричну енергію. Для цього він складається з кількох діодів, встановлених послідовно на шляху світла під різними кутами таким чином, щоб після багаторазового відбиття світло не вийшло з пастки

Розвиток фотодіодних приймачів і останні їх розробки дозволяють стверджувати, що відбувся якісний скачок в точності розрахунку коефіцієнта перетворення фотодіодів, що дозволяє їх використовувати як приймачі з передбаченою квантовою ефективністю (Predictable Quantum Efficient Detector).

Кращі досягнення в цій області дозволяють забезпечувати квантову ефективність трап-детекторів близько 100%, завдяки чому вони одержали назву *абсолютних приймачів*.

Використання трап-детекторів як абсолютних приймачів починаючи з 1995р. стало звичайною практикою. За таким принципом побудовані первинні еталони Канади, Нової Зеландії, Німеччини, Туреччини, а також вторинні еталони Німеччини, Англії, США. Використання коштовних та складних під час експлуатування криогенних радіометрів стає економічно недоцільним.

Саме на цьому методі побудовано первинний еталон України.

4.6.4. Перспективи метода, що ґрунтується на рахуванні числа фотонів [47, 49]

Сучасні квантові технології і практичні досягнення в управлінні і рахуванні окремих фотонів обіцяють нові досягнення в прецизійній і практичній фотометрії, створенні приладів нового покоління. Це стимулює перевизначення фотометричних величин через кількість фотонів, тобто прив'язки до сталої Планка і частоти. Цей підхід називається *“підхід на основі числа фотонів”*.

Очікується, що це дозволить досягти більшої узгодженості між основними одиницями SI і сприяти подальшому розвитку оптичних вимірювань в цілому.

Фотонні величини, згідно ДСТУ 3651.1–97, наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Фотонні величини і їхні одиниці

Величина		Одиниця		
Назва	Розмірність	Назва	Позначення	
Число фотонів	1	Один	1	1
Фотонний потік	T ⁻¹	Секунда в мінус першому степені	c ⁻¹	s ⁻¹
Фотонна інтенсивність	T ⁻¹	Секунда в мінус першому степені на стерадіан	c ⁻¹ /sr	s ⁻¹ /sr
Фотонна яскравість	L ⁻² T ⁻¹	Секунда в мінус першому степені на стерадіан – квадратний метр	c ⁻¹ /(sr·m ²)	s ⁻¹ /(sr·m ²)
Фотонна випромінюваність	L ⁻² T ⁻¹	Секунда в мінус першому степені на квадратний метр	c ⁻¹ /m ²	s ⁻¹ /m ²
Фотонна опромінюваність	L ⁻² T ⁻¹	Секунда в мінус першому степені на квадратний метр	c ⁻¹ /m ²	s ⁻¹ /m ²
Фотонна експозиція	L ⁻²	Метр у мінус другому степені	m ⁻²	m ⁻²

Як первинний метод реалізації одиниць величин, значення яких обумовлюються числом фотонів, є метод застосування джерела, що *генерують окремі фотони* з відомою швидкістю, а також детекторів, здатних *точно підраховувати* число фотонів. Оскільки кожен фотон можна розглядати як квант енергії, що залежить від частоти, концептуально легко можна співвідносити число фотонів із кількістю енергії або потужністю.

Наприклад, світловий потік Φ може бути поданий через число фотонів n :

$$\Phi = nhf/t,$$

де h – стала Планка, f – частота світлового випромінювання (540×10^{12} Гц).

У свою чергу, якщо ми знаємо Φ , ми можемо підрахувати **фотонний потік**:

$$n/t = \Phi/hf.$$

Енергетична сила випромінювання відповідає фотонній силі $(683 \times 540 \times 10^{12} \times 6,62606896 \times 10^{-34})^{-1}$ фотонів за секунду на стерadian.

На цей час вже існують монофотонні джерела, а також детектори, здатні підрахувати окремі фотони (фотопомножувачі, однофотонні лавинні діоди, надпровідні нанодротові детектори тощо).

Тим не менш поки зарано говорити про розробку надійних промислових методів і засобів маніпулювання окремими фотонами, і саме через їх відсутність перевизначення фотометричних одиниць в квантових термінах поки не відбулось. Але ця задача фігурує серед перспективних в міжнародних програмах з метрології.

4.6.5. Еталон одиниці сили світла України [26, 46]

Створений в ННЦ “Інститут метрології” первинний еталон кандели базується на методі з застосуванням **приймача-фотометра на трап-детекторі** (рис. 4.25).

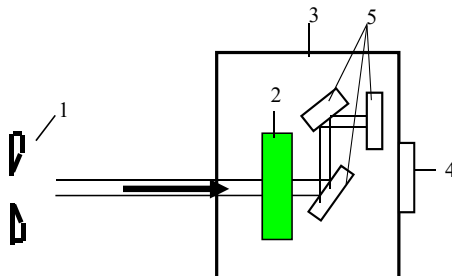


Рис. 4.25. Схема фотометра на базі трап-детектора:
 1 – джерело світла, 2 – фільтр $V(\lambda)$, 3 – корпус, 4 – дзеркало,
 5 – фотодіоди S1337

До складу еталона, крім фотометра, входять також:

- система лінійних вимірювань – для точного вимірювання відстані між світловимірювальною лампою і приймачем;

- джерела світла – світловимірювальні лампи;
- установка для вимірювання нелінійності фотометрів;
- прецизійні джерела живлення і інша допоміжна апаратура.

Первинний еталон України, крім одиниці сили світла (кандели), відтворює також одиниці *освітленості* (люкс) і *освітлення* (кандела на секунду).

Еталон 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;

Відносні стандартні невизначеності (u) відтворення одиниць не перевищують: сили світла $u = 1 \cdot 10^{-3}$; освітленості $u = 1,5 \cdot 10^{-3}$; освітлення $u = 2 \cdot 10^{-3}$.

Ці значення відповідають сучасному рівню.

Таким чином, з вищесказаного витікає:

- Перевизначення кандели 1979 р. відкрило шлях до розробки нових методів її відтворення з використанням не тільки еталонного випромінювача (чорного тіла), але й *еталонного приймача*. Це положення є справедливим і для Нової SI-2019. Сьогодні використовуються два види еталонних приймачів: *радіометр і фотоприймач*. Найкращі метрологічні характеристики забезпечує *кріогенний радіометр*, але використання в фотоприймачах нових видів фотодетекторів – *тран-детекторів* з 100-відсотковою квантовою ефективністю – зробило їх конкурентоспроможними і при створенні еталонної апаратури.

- Сучасні квантові технології і практичні досягнення в управлінні і рахуванні окремих фотонів обіцяють нові досягнення в прецизійній і практичній фотометрії, створенні приладів нового покоління, перевизначення фотометричних величин через кількість фотонів, тобто прив'язки до сталої Планка. Очікується, що це дозволить досягти більшої узгодженості між основними одиницями SI і сприяти подальшому розвитку оптичних вимірювань в цілому. Недавні досягнення, отримані в управлінні і рахуванні окремих фотонів, а також у створенні однофотонних джерел, виглядають багатообіцяюче.

4.7. Моль

4.7.1. Коротка історія

Одиниця кількості речовини – моль – була затверджена як сьома основна одиниця SI в 1977 році рішенням 14-ої CGPM і мала таке визначення: **“Моль є кількістю речовини системи, що містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг. При застосуванні моля структурні елементи повинні бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами та іншими частинками або специфікованими групами частинок”**. У цьому визначенні припускається, що кілограм визначений незалежно.

Історія появи цієї одиниці така [25]. У 1811 році А. Авогадро, гнучуючись на дослідах Ж. Л. Гей-Люссака, висловив гіпотезу, що однакові об’єми різних газів за однакового тиску містять одне і те саме число молекул. Кількість речовини і трактувалася як число молекул, але вона вважалася безпосередньо пов’язаною з масою і навіть тотожною їй. Це уявлення спиралося на переконання, що маса будь-якої молекули даної речовини завжди постійна. Звідси існувало уявлення моля як індивідуальної одиниці маси у тому сенсі, що розмір цієї одиниці для кожної речовини є особливим. Хоча зазвичай кількість речовини визначали зважуванням, проте було знайдено й інші, незалежні від маси способи (шляхом вимірювання об’єму, інтенсивності радіоактивного випромінювання та ін.). Це похитнуло переконання в тотожності маси та кількості речовини і призвело до усвідомлення того факту, що кількість речовини є незалежною одиницею SI. З існуючого визначення моля випливає, що $M(^{12}\text{C})=0,012 \text{ кг}\cdot\text{моль}^{-1}= 0,012 M_u$, де, як показано вище, $M_u=10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{моль}^{-1}$ – стала молярної маси. Звідси випливає, що якщо прийняти точне значення N_A , то значення $M(^{12}\text{C})$ у кілограмах теж буде точно відомо, так що $1 \text{ кг} = [N_A \cdot 1 \text{ моль } M(^{12}\text{C})]/0,012$, а це суперечить початковому припущенню про незалежність визначення кілограма. Таким чином, тільки якщо визначати моль, пов’язуючи його з точним значенням N_A незалежно від кілограма, можна уникнути такої неузгодженості у визначеннях.

4.7.2. Нове визначення моля [50]

Визначення, що введено у SI-2019, ґрунтуються на фіксації сталої Авогадро точно $6,02214 \times 10^{23}$ моль⁻¹. Це визначення не тільки зберігає основне визначення N_A як числа частинок у молі й пов'язує моль із точним значенням $N_A = 6,02214 \times 10^{23}$ моль⁻¹, що не накладає жодних обмежень на кілограм, але і зберігає основне співвідношення між мольною масою речовини Y і масою його структурного елемента. До того ж, наявне визначення моля (моль⁻¹) чітко показує, що моль – це одиниця кількості структурних елементів, яка не має жодного стосунку до маси.

Наразі найточніша реалізація моля є результатом експерименту, проведення якого привело до визначення сталої Авогадро. Експеримент полягав у визначенні кількості атомів ²⁸Si (N) у монокристалі Si, збагаченому ²⁸Si, за допомогою вимірювань об'єму й інтерферометричних вимірювань рентгенівського випромінювання:

$$N = 8V_s / a (^{28}\text{Si})^3,$$

де V_s – об'єм кристала, 8 – число атомів на елементарну комірку кристалічного кремнію та $a (^{28}\text{Si})$ – параметр решітки кубічної елементарної комірки. Це рівняння справедливе лише в тому гіпотетичному випадку, якщо в наявності є ідеальний кристал чистого ²⁸Si – отже, всі елементарні частинки в кристалі були ідентифіковані.

За використанням фіксованого чисельного значення сталої Авогадро, кількість речовини n ²⁸Si у макроскопічному кристалі визначається так:

$$N = 8V_s / (a (^{28}\text{Si})^3 N_A).$$

Це дозволяє реалізувати визначення як моля, так і кілограма з відносною стандартною невизначеністю менш ніж 2×10^{-8} у монокристалі Si, збагаченому ²⁸Si.

4.7.3. Наслідки перевизначення моля

При існувавшому до 2019 р. визначенні моля кількість речовини – це деяка невідома кількість частинок, маса яких відома. Фіксація N_A змінить фізичну суть кількості речовини і моля при тому, що кілограм буде визначено незалежно (через сталу Планка). Фіксація N_A і прив'язка до цієї

сталої моля означатиме, що кількість речовини буде ототожнена з кількістю частинок. Слово “моль” стане позначенням деякого відомого безрозмірного числа (числа Авогадро). Зараз поняття моля і N_A тісно пов’язані з атомною одиницею маси (а.о.м.). При фіксації числа Авогадро воно означатиме відому кількість частинок у кількості речовини невідомої маси.

Підкреслимо, що при новому визначенні моля молярна маса вуглецю-12 більш не є точно відомою і повинна визначатися експериментально, але її значення узгоджується з $0,012 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$ із невизначеністю менше $2 \cdot 10^{-9}$.

Таким чином, 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.

4.8. Висновки до розділу 4

1. Нове формулювання *секунди* через зафіксоване значення частоти надтонкого квантового переходу в атомі цезія не змінило суті і методики її відтворення в SI-2019. Але проведені в останні роки дослідження ОКГ, зокрема, використання технологій глибокого лазерного охолодження атомів, свідчать про можливість досягнення в ОКГ суттєво меншої невизначеності відтворення секунди (близько 10^{-18}), ніж в цезієвому стандарті (10^{-16}), що веде до можливості перевизначення секунди і методології її реалізації.

2. В основі сучасної первинної реалізації *метра* покладено фіксація швидкості світла, використання стабілізованого лазера як джерела світла, а також фемтосекундних технологій для вимірювання частоти цього лазера.

Прийняття визначення метра через швидкість світла привело до прямого зв’язку одиниць часу (частоти) і довжини. Отже, у сукупності державний еталон часу-частоти, система стабілізованих лазерів і вимірювання їх частоти, інтерферометричний компаратор складають *єдиний еталон одиниць часу, частоти і довжини*.

Успіхи в галузі нанотехнологій дозволили прийняти в якості вторинного еталона для *нанометрії* довжину ребра елементарної криста-

лічної ґратки кремнію, а також запропонувати методи реалізації одиниці довжини в нанометровому діапазоні.

3. З 2019 р у новій SI діє визначення **ампера** через **елементарний заряд**, що покінчило з дуалізмом в електричних вимірюваннях. Таким чином, первинне відтворення ампера на цей час відбувається з використанням квантових технологій. Можливі два рівноправні первинні методи відтворення ампера: **опосередкований** (через “квантові” вольт і ом з використанням закону Ома) і **прямий** (з використанням ефекту одноелектронного тунелювання).

Обидва методи мають близькі метрологічні можливості і дозволили підвищити точність відтворення ампера на 2-3 порядки у порівнянні з методом “струмових ваг”.

4. Заміна первинного еталона **кілограма**, що до 2019р. існував у вигляді платино-іридієвого артефакту, на природний було однією з найважливіших цілей реформи SI. Запропоновано дві реалізації природного кілограма, які одержали умовні назви “електричного” та “атомного” кілограмів.

В основі “**електричного кілограма**” лежить порівняння електричної і механічної потужності, а вирішальними факторами є високі точності вимірювання електричних величин, досягнуті завдяки квантовим ефектам Джозефсона та Холла.

Альтернативним є метод “**атомного кілограма**”, який заснований на можливості відтворення його розміру через масу і кількість атомів певної речовини, зокрема, кремнію ^{28}Si , і простежуваності до сталої Планка.

Оцінка відносної стандартної невизначеності відтворення кілограма обома методами показує, що методи забезпечують необхідні для перевизначення кілограма точності при абсолютній стабільності.

Перевизначення кілограма означає відмову від останнього артефакту і перехід до повністю природної системи одиниць, що ґрунтується на еталонах природи – ФФС і методах, які дозволяють пов’язати ФФС з величинами макросвіту.

5. Перевизначення **кельвіна**, що відбулося у 2019 році, матиме незначний вплив на повсякденне життя, але надаватиме важливі переваги в довгостроковій перспективі. Прогнозується, що найближчими десятиріччями МТШ-90 все ще залишатиметься актуальною та буде підлягати додатковому удосконаленню. **Первинна радіометрія** та реперні точки з високою температурою будуть використовуватися для поширення ре-

алізації термодинамічних температур із низькою невизначеністю для області високих температур.

6. Прогнозується подальший розвиток фундаментальної *оптичної метрології* (відтворення кандели на основі рахування числа фотонів (однофотоніки), розвиток фотонних пристроїв, захищеного зв'язку, квантових обчислень, біофотоніки), а у промисловості зросте попит на гнучкі еталони оптичних одиниць для використання на робочому місці.

Зростає роль метрології в таких нових технологіях як *нановимірювання*, де її ключовим завданням буде впровадження простежуваних вимірювань в нанодіапазоні.

У прикладному аспекті актуальними є подальші дослідження оптичних джерел світла: світлодіодів, OLED-масивів та OLED-дисплеїв, оптичних волокон для комунікаційних технологій. Ряд завдань стоять перед оптичною метрологією в галузях енергетики, охорони здоров'я та навколишнього середовища.

4.9. Контрольні питання до розділу 4

1. Як змінилось визначення секунди в SI-2019 і чи веде воно до нової методики її відтворення?
2. В якому напрямку йде розвиток у даному виді вимірювань?
3. Яка стала покладена в основу визначення метра в SI-2019 і що змінилось у порівнянні з попередньою версією?
4. Як відтворюється метр в діапазоні великих і дуже малих довжин?
5. Чому виникла необхідність у перевизначенні кілограма?
6. Як може бути відтворено кілограм за визначенням у SI-2019?
7. Чому виникла необхідність у перевизначенні кельвіна і які перспективи його впровадження?
8. Як може бути відтворено одиницю сили світла?
9. Що таке трап-детектор?
10. Що змінилось у визначенні моля в SI-2019 і чи вплинуло це на практику фізико-хімічних вимірювань?
11. Як змінилось визначення ампера в SI-2019 і до чого це веде: в точності відтворення? В методиці відтворення? В розвитку електрорадіовимірювань?

5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНOSTІ ВИМІРЮВАНЬ

Результат вимірювання, виконаний в лабораторії, є простежуваним до одиниці SI, якщо він може бути співвіднесений з основою для порівняння (еталоном) через документований безперервний ланцюг калібрувань, кожне з яких робить внесок у невизначеність вимірювань. Документом, що підтверджує простежуваність, є сертифікат калібрування з логотипом органу акредитації, виданий акредитованою у певній сфері вимірювань калібрувальною лабораторією. Тому калібрування ЗВТ є основним елементом метрологічної простежуваності вимірювань, необхідної для забезпечення компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій, акредитованих на відповідність вимогам стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 [52].

Калібрування підлягають:

- а) власні вихідні еталони та зразкові речовини лабораторії;
- б) ЗВТ лабораторії або взяті на прокат (в оренду), які застосовуються під час калібрувань;
- в) обладнання лабораторії, якщо його характеристики суттєво впливають на результати калібрувань.

Лабораторія повинна мати програму та процедури калібрувань всіх перерахованих ЗВТ та обладнання. Під час створення програм та процедур необхідно вказувати невизначеність вимірювань.

5.1. Основні терміни та визначення

Метрологічна простежуваність (metrological traceability) – властивість результату вимірювання, відповідно до якої результат може бути співвіднесений з основою для порівняння через документований безперервний ланцюг калібрувань, кожен з яких робить внесок у невизначеність вимірювань [7].

ПРИМІТКА 1. У цьому визначенні “основою для порівняння” може бути визначення одиниці вимірювання через її практичну реалізацію,

або методика вимірювань, що включає одиницю вимірювання для величин, відмінних від порядкових, або еталон.

Калібрування (calibration) – операція, в ході якої при заданих умовах на першому етапі встановлюють співвідношення між значеннями величин з невизначеностями вимірювань, які забезпечують еталони, і відповідними показаннями ЗВТ, що калібрується, з властивими їм невизначеностями, а на другому етапі на основі цієї інформації встановлюють співвідношення, що дозволяє згодом отримувати результат вимірювання виходячи з показання відкаліброваного ЗВТ [7].

Похибка вимірювання (measurement error) – різниця між виміряним значенням величини та її опорним значенням [7].

Систематична похибка вимірювання (systematic measurement error) – складова похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях [7].

ПРИМІТКА 1. Опорним значенням величини для систематичної похибки вимірювання є істинне значення величини, або виміряне значення величини еталона з дуже малою невизначеністю вимірювань, або прийняте значення величини.

Зміщення (bias) – оцінка систематичної похибки вимірювання [7].

Виправлення (correction) – компенсація оціненого систематичного ефекту [7].

ПРИМІТКА 1. Див [36] для роз'яснення поняття “систематичний ефект”: “Передбачається, що після внесення поправки математичне сподівання похибки, обумовленої систематичним ефектом, стає рівним нулю. Невизначеність поправки, що вноситься в результат вимірювання для компенсації систематичного ефекту ... є мірою невизначеності результату через неповне знання про значення поправки, яке вимагається”.

ПРИМІТКА 2. Ця компенсація може мати різні форми, такі як додатковий доданок або коефіцієнт, або вона може перераховуватися за таблицею.

Випадкова похибка вимірювання (random measurement error) – складова похибки вимірювання, яка при повторних вимірюваннях змінюється у непередбачуваний спосіб [7].

ПРИМІТКА 1. Опорним значенням величини для випадкової похибки вимірювання є середнє арифметичне, яке може бути отримана в

результаті нескінченно великого числа повторних вимірювань однієї і тієї ж вимірюваної величини.

Похибка контрольної точки (datum measurement error) – похибка ЗВТ або вимірювальної системи (ВС) для заданого значення вимірюваної величини [7].

Максимальна допустима похибка вимірювання (maximum permissible measurement error) – граничне значення похибки вимірювання відносно відомого опорного значення величини, дозволене специфікацією або нормативними документами для даного вимірювання, ЗВТ або ВС [7].

5.2. Засоби та методи вимірювань, які застосовуються при калібруванні

Засіб вимірювальної техніки (measuring instrument) – пристрій, що використовується для виконання вимірювань, у тому числі у поєднанні з одним або декількома додатковими пристроями [7].

ПРИМІТКА. ЗВТ може бути вимірювальним приладом (ВП) або матеріальною мірою (ММ).

Вимірювальний прилад (indicating measuring instrument) – ЗВТ, який забезпечує вихідний сигнал, що несе інформацію про значення вимірюваної величини [7].

Матеріальна міра (material measure) – ЗВТ, який відтворює у процесі використання чи постійно зберігає приписані значення величин одного чи більше даних родів [7].

ПРИМІТКА 1. Показанням ММ є значення величини, що їй приписано.

Пристрій порівняння (ПП) (transfer device) – пристрій, який використовується як засіб звірення еталонів [7].

Стандартний зразок (СЗ) (reference material) – матеріал, досить однорідний і стабільний щодо певних властивостей для того, щоб використовувати його при вимірюванні або при оцінюванні якісних властивостей відповідно до передбачуваного призначення [7].

ПРИМІТКА. Для калібрування ... можуть використовуватися тільки СЗ з приписаними значеннями величини.

Метод вимірювань (measurement method) – загальний опис логічної послідовності операцій під час вимірювання [7].

Метод безпосередніх вимірювань (direct method of measurement) – метод вимірювань, при якому значення величини визначають безпосередньо за індикуючим ВП [53].

ПРИМІТКА. Метод вимірювання залишається безпосереднім, навіть якщо необхідно провести додаткові вимірювання та визначити значення впливових величин, щоб ввести поправки.

Метод непрямих вимірювань ([53], 311-02-02) (indirect method of measurement) – метод вимірювань, при якому значення величини отримують методом безпосередніх вимірювань інших величин, пов'язаних з вимірюваною величиною за допомогою відомої залежності [53].

Метод вимірювання звірянням/метод порівняння з мірою (comparison method of measurement) – метод вимірювання, заснований на порівнянні вимірюваної величини з відомою величиною того ж виду [53].

5.3. Оцінювання невизначеності вимірювань

5.3.1. Основні терміни та визначення

Невизначеність (вимірювання) (measurement uncertainty) – невід'ємний параметр, що характеризує розсіювання значень величини, які приписують вимірюваній величині на основі використовуваної інформації [7].

ПРИМІТКА 2. Параметром може бути, наприклад, стандартне відхилення, зване стандартною невизначеністю вимірювань (або кратне йому число) або половина ширини інтервалу з встановленою ймовірністю охоплення.

Інструментальна невизначеність (instrumental measurement uncertainty) – складова невизначеності вимірювань, обумовлена застосуванням ЗВТ або ВС [7].

ПРИМІТКА 1. Інструментальну невизначеність виявляють при калібруванні ЗВТ або ВС, за винятком первинного еталону, коли для цього використовують інші підходи.

ПРИМІТКА 2. Інструментальну невизначеність використовують при оцінюванні невизначеності вимірювань за типом *B*.

ПРИМІТКА 3. Інформація, що стосується інструментальної невизначеності, може бути наведена у специфікації ЗВТ.

Модель вимірювання (measurement model) – математичний зв'язок між усіма величинами, про які відомо, що вони беруть участь у вимірюванні [7].

Вхідна величина в моделі вимірювань (input quantity) – величина, яка повинна бути виміряна, або величина, значення якої може бути отримано іншим способом, для обчислення вимірюваного значення вимірюваної величини [7].

ПРИМІТКА. Вхідними величинами в моделі вимірювань можуть бути показання, поправки та величини, що впливають.

Вихідна величина моделі вимірювань (output quantity) – величина, виміряне значення якої обчислюють, використовуючи значення вхідних величин в моделі вимірювань [7].

Впливна величина (influence quantity) – величина, яка при прямому вимірюванні не впливає на величину, яку фактично вимірюють, але впливає на співвідношення між показанням і результатом вимірювання [7].

Стандартна невизначеність (вимірювань) (standard measurement uncertainty) – невизначеність вимірювань, виражена у вигляді стандартного відхилення [7].

Відносна стандартна невизначеність вимірювань (relative standard measurement uncertainty) – стандартна невизначеність вимірювань, поділена на абсолютне значення вимірюваного значення величини [7].

Оцінювання невизначеності вимірювань за типом *A* (type *A* evaluation of measurement uncertainty) – оцінювання складової невизначеності вимірювань шляхом статистичного аналізу вимірюваних значень величини, що були одержані за певних умов вимірювання [7].

Оцінювання невизначеності вимірювань за типом *B* (type *B* evaluation of measurement uncertainty) – оцінювання складової невизначеності вимірювань способами, відмінними від оцінювання невизначеності вимірювань за типом *A* [7].

ПРИКЛАДИ. Оцінювання на основі інформації:

- пов'язаної зі значеннями величини, взятими з авторитетних публікацій;
- пов'язаної зі значенням атестованого стандартного зразка;

- отриманої із сертифікатів калібрування;
- про дрейф;
- пов'язаної з класом точності повіреного засобу вимірювань;
- отриманої з границь, встановлених з урахуванням особистого досвіду.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювань (combined standard measurement uncertainty) – стандартна невизначеність вимірювань, яку отримують виходячи з індивідуальних стандартних невизначеностей вимірювань, пов'язаних із вхідними величинами в моделі вимірювань [7].

ПРИМІТКА. У разі кореляції вхідних величин у моделі вимірювань при обчисленні сумарної стандартної невизначеності вимірювань повинні також враховуватися коваріації.

Кореляція – статистичний взаємозв'язок між результатами одночасних багаторазових вимірювань двох або більше вхідних величин.

Розширена невизначеність вимірювань (expanded measurement uncertainty) – добуток сумарної стандартної невизначеності та коефіцієнта більшого, ніж число один [7].

ПРИМІТКА. Коефіцієнт залежить від виду розподілу ймовірностей вихідної величини в моделі вимірювань і обраної ймовірності охоплення.

Бюджет невизначеності (uncertainty budget) – звіт про невизначеність вимірювань, складових невизначеності, їх обчислення та підсумування [7].

ПРИМІТКА Бюджет невизначеності може включати модель вимірювань, оцінки та невизначеності вимірювань, пов'язані з величинами, що входять до моделі вимірювань, коваріації, види застосовуваних функцій щільності ймовірностей, число степенів свободи, тип оцінювання невизначеності та коефіцієнт охоплення.

5.3.2. Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань

Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань описаний у [36, 55, 56]. Він включає наступні кроки.

1. Складання моделі вимірювання

Моделю вимірювання виражає залежність між вихідною (вимірюваною) величиною Y і вхідними величинами X_1, X_2, \dots, X_N :

$$Y = f(X_1, \dots, X_N) . \quad (5.1)$$

2. Оцінювання вхідних величин

Значення вхідних величин x_1, x_2, \dots, x_N знаходять шляхом їх вимірювань з одноразовими (одичними) або багаторазовими (повторними) спостереженнями або беруть із зовнішніх джерел.

При проведенні багаторазових вимірювань за значення i -ї вхідної величини приймають середнє арифметичне результатів ряду окремих спостережень:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}. \quad (5.2)$$

де n_i – кількість спостережень, що виконуються при вимірюванні X_i .

3. Обчислення оцінки вимірюваної величини

Оцінку вимірюваної величини отримують при підстановці в модель вимірювання (5.1) оцінок вхідних величин x_1, \dots, x_N :

$$y = f(x_1, \dots, x_N). \quad (5.3)$$

4. Обчислення стандартних невизначеностей вхідних величин

4.1. Стандартна невизначеність вимірювань типу A i -ї вхідної величини знаходиться за формулою:

$$u_A(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i - 1)} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}. \quad (5.4)$$

4.2. Стандартна невизначеність вимірювання типу B i -ї вхідної величини залежить від апіорної інформації про мінливість вхідної величини, вираженої стандартним відхиленням S_i , нижньою ε^- і верхньою ε^+ границями інтервалу, в якому знаходяться можливі її значення, або розширеною невизначеністю U .

1) Якщо мінливість вхідної величини X_i представлена стандартним відхиленням S_i , воно приймається рівним її стандартної невизначеності $u_A(x_i)$:

$$u_A(x_i) = S_i. \quad (5.5)$$

2) Якщо відомо, що вхідна величина X_i має мінливість в границях інтервалу $[\varepsilon^-; \varepsilon^+]$, то її стандартну невизначеність можна визначити за формулою:

$$u_A(x_i) = (\varepsilon^+ - \varepsilon^-) / 2\alpha_i, \quad (5.6)$$

де коефіцієнт α_i вибирається залежно від прийнятого закону розподілу можливих значень X_i усередині цих границь. Якщо границі інтервалу $[\varepsilon^-; \varepsilon^+]$ симетричні щодо нуля, тобто $\varepsilon^- = -\varepsilon$; $\varepsilon^+ = \varepsilon$, то

$$u_A(x_i) = \varepsilon / \alpha_i. \quad (5.7)$$

Види деяких обмежених законів розподілу, значення їх коефіцієнту α та випадки їх застосування наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Закони розподілу для обмежених інтервалів

Закон	Випадки застосування
 <p>Рівномірний, $\alpha = \sqrt{3}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • специфікація вказує границі без вказівки рівня довіри, наприклад, границя допустимої похибки ЗВТ; • зроблено припущення у вигляді максимального інтервалу границь $\pm\varepsilon$ без будь-яких знань про закон розподілу, наприклад, границі зміни температури в лабораторії.
 <p>Трикутний, $\alpha = \sqrt{6}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • коли можна вважати, що значення вхідної величини поблизу оціненого значення вірогідніші, ніж біля границь, наприклад, при відтворенні об'єму рідини за допомогою мірного посуду; • вхідна величина є сумою двох величин з рівномірним законом розподілу однакової ширини, наприклад, у методі заміщення похибка відліку входить до рівняння вимірювання двічі.
 <p>Арксинусний, $\alpha = \sqrt{2}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • коли вхідна величина є параметром функції, що синусоїдально змінюється, зокрема, при електричних вимірюваннях синусоїдальної напруги або при кутових вимірюваннях (наприклад, похибка відліку часу по циферблату секундоміра, викликана ексцентриситетом осі його стрілки); • для отримання максимально можливого значення стандартної невизначеності з відомих границь.

3) Границі мінливості величини X_i виражені розширеною невизначеністю U_i , яка розрахована для рівня довіри p .

У цій ситуації для оцінювання стандартної невизначеності типу B слід розділити значення U_i на відповідний для даного випадку коефіцієнт охоплення k_i :

$$u_B(x_i) = \frac{U_i}{k_i}. \quad (5.8)$$

5. Обчислення внеску невизначеності вхідної величини у невизначеність вимірюваної величини

Внесок $u_i(y)$ невизначеності $u(x_i)$ кожної вхідної величини X_i в невизначеність вимірюваної величини $u(y)$ (сумарну стандартну невизначеність) визначають як добуток $u(x_i)$ на коефіцієнт чутливості c_i :

$$u_i(y) = c_i u(x_i). \quad (5.9)$$

Коефіцієнти чутливості c_i показують, як оцінка вихідної величини y змінюватиметься зі зміною оцінок вхідних величин x_i . Їх знаходять як часткові похідні вихідної величини за кожною з вхідних величин:

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_N}. \quad (5.10)$$

5.1. Для модельного рівняння у вигляді лінійної комбінації вхідних величин виду

$$Y = A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_N X_N,$$

де A_1, A_2, \dots, A_N – постійні коефіцієнти, коефіцієнти чутливості дорівнюють коефіцієнтам при вхідних величинах:

$$c_1 = A_1, c_2 = A_2, \dots, c_N = A_N.$$

5.2. Для модельного рівняння у вигляді добутку ступеневих одночленів

$$Y = B \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_N^{\beta_N}$$

коефіцієнти чутливості c_i дорівнюють відношенню значення вимірюваної величини y до значення відповідної вхідної величини x_i , помноженого на відповідний ступінь β_i :

$$c_1 = \beta_1 \frac{y}{x_1}, c_2 = \beta_2 \frac{y}{x_2}, \dots, c_N = \beta_N \frac{y}{x_N}.$$

6. Обчислення стандартної невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності)

Обчислення сумарної стандартної невизначеності здійснюється за формулою, яка називається законом поширення невизначеності.

За відсутності кореляцій між результатами вимірювання вхідних величин стандартна невизначеність вихідної величини визначається як:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{c_1^2 u^2(x_1) + c_2^2 u^2(x_2) + \dots + c_N^2 u^2(x_N)}. \quad (5.11)$$

Якщо в моделі вимірювань (5.1) присутні дві вхідні величини (наприклад, X_k, X_m), результати багаторазових вимірювань яких виконані одночасно і корелюють між собою з коефіцієнтом кореляції r_{km} , то вираз для сумарної стандартної невизначеності матиме наступний вигляд:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2r_{km} c_k c_m u(x_k) u(x_m)}. \quad (5.12)$$

У загальному випадку формула для сумарної стандартної невизначеності з урахуванням кореляції між результатами вимірювань всіх вхідних величин має вигляд [36]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N r_{ij} c_i c_j u(x_i) u(x_j)}. \quad (5.13)$$

7. Обчислення розширеної невизначеності

Розширену невизначеність U отримують шляхом множення невизначеності вихідної величини (сумарної стандартної невизначеності) на коефіцієнт охоплення:

$$U(y) = k \cdot u_c(y). \quad (5.14)$$

Коефіцієнт охоплення k являє собою множник, на який множать оцінку стандартної сумарної невизначеності u_c для отримання розширеної невизначеності U .

Вибір коефіцієнта охоплення слід проводити з урахуванням аналізу бюджету невизначеності (табл. 5.4). Алгоритм вибору коефіцієнта охоплення в цьому випадку можна представити у вигляді, зображеному на рис. 5.1.

За наявності вкладів невизначеності типу A , рекомендується брати як коефіцієнт охоплення коефіцієнт Стьюдента для ймовірності приблизно рівної 0,95 (точно рівної 0,9545) і ефективного числа степенів свободи ν_{eff} [36, 5.7]:

$$k = t_p(\nu_{eff}). \quad (5.15)$$

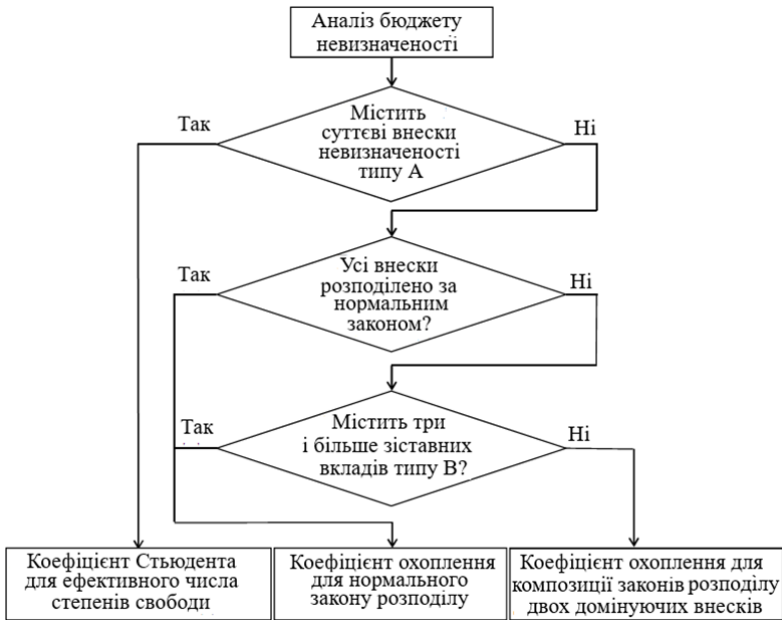


Рис. 5.1 Алгоритм вибору коефіцієнта охоплення при оцінюванні розширеної невизначеності вимірювань

Ефективне число степенів свободи визначається за формулою Велча-Саттерсвейта:

$$v_{eff} = u^4(y) / \sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i} \quad (5.16)$$

де v_i – число степенів свободи i -ї вхідної величини (см. табл. 5.2).

Значення коефіцієнтів Стьюдента для ймовірності $p = 0,9545$ та дробового числа степенів свободи v_{eff} наведені у табл. Д.2.1 Додатку 2.

За наявності в моделі вимірювань тільки однієї вхідної величини, оціненої за типом A з числом спостережень n , формула (5.16) може бути представлена у вигляді:

$$v_{eff} = (n-1) \left[\frac{u_c(y)}{u_A} \right]^4 \quad (5.17)$$

Таблиця 5.2

Значення чисел степенів свободи стандартних невизначеностей
вхідних величин

Стандартна невизначеність вхідної величини	Формула	ν_i
Типу <i>A</i> , для <i>n</i> вимірювань	(5.4)	$n - 1$
Типа <i>B</i> , СКВ одноразових вимірювань, яке визначено за раніш проведеними <i>n</i> вимірюваннями	(5.5)	$n - 1$
Типу <i>B</i> , яка обчислена через границі, наведені без вказівки рівня довіри, наприклад границі допустимої похибки ЗВТ	(5.7), (5.8)	∞
Типу <i>B</i> , яка обчислена через розширену невизначеність U_j і коефіцієнт охоплення k_i , який дорівнює коефіцієнту Стьюдента для ефективного числа степенів свободи ν_{eff} та ймовірності 0,9545	(5.8)	ν_{eff}

За відсутності вкладів невизначеності типу *A* та числі степенів свободи вкладів невизначеності типу *B*, які дорівнюють нескінченності, формула (5.16) дає нескінченність, тому коефіцієнт охоплення формально повинен дорівнювати коефіцієнту Стьюдента від нескінченності для ймовірності 0,9545, тобто $k = t_{0,9545}(\infty) = 2,0$. Однак таке значення коефіцієнта охоплення відповідає випадку, коли значенням вимірюваної величини *Y* приписують нормальний закон розподілу, що є результатом впливу на неї великої кількості факторів (джерел невизначеності), або коли є три і більше зіставних вкладів невизначеності, розподілених за будь-яким іншим законом.

При визначенні коефіцієнта охоплення для композиції двох домінуючих аномальних вкладів невизначеності (що відрізняються не менше ніж у 3 рази від інших), необхідно користуватися таблицями, наведеними в пунктах С1.8, С1.10-С1.12 додатка С документа [56] (таблиці Д.2.2-Д.2.5 Додатка 2).

8. Запис повного результату вимірювання

Повний результат вимірювання включає в себе оцінку вихідної величини і приписане їй значення розширеної невизначеності із зазначеним рівнем довіри:

$$Y = y \pm U, p = 0,95. \quad (5.18)$$

При записі повного результату вимірювання слід дотримуватися таких правил округлення:

1. Числове значення розширеної невизначеності вказується не більше ніж з двома значущими цифрами.

2. Числове значення вимірюваної величини має закінчуватися десятковим знаком того ж розряду, що і округлена розширена невизначеність.

3. Якщо цифра старшого з розрядів, що відкидаються, у числовому значенні вимірюваної величини або розширеної невизначеності менше 5, то цифри числа, що залишаються, не змінюють, якщо цифра старшого розряду більша або дорівнює 5, то останню залишкову цифру збільшують на одиницю.

4. При округленні розширеної невизначеності його значення слід вказувати із округленням у бік збільшення, якщо при округленні воно зменшується більш ніж на 5%. Слід зазначити, що останнє правило працює тільки при прямих одноразових вимірюваннях при округленні значення розширеної невизначеності до однієї значущої цифри так, як зазначено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Особливості округлення розширеної невизначеності до однієї значущої цифри

Значення, що округлюють $\cdot 10^n$, $n = 0, -1, -2, \dots$	1,06- 2,10	2,11- 3,15	3,16- 4,21	4,22- 5,26	5,27- 6,31	6,32- 7,36	7,37- 8,42	8,43- 9,47	9,48- 10,5
Округлене значення $\cdot 10^n$, $n = 0, -1, -2, \dots$	2	3	4	5	6	7	8	9	10

5.3.3. Складання бюджету невизначеності

Усі отримані у процесі реалізації базового алгоритму результати зручно представляти як бюджет невизначеності (табл. 5.4).

Бюджет включає список всіх вхідних величин, їх оцінок разом з приписаними їм стандартними невизначеностями вимірювання, коефіцієнтами чутливості і числами степенів свободи.

Крім інформації про вхідні величини до бюджету зручно включати інформацію про вимірювану величину: числове значення, сумарну стандартну невизначеність, ефективне число степенів свободи, коефіцієнт охоплення і розширену невизначеність.

Таблиця 5.4

Бюджет невизначеності

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності
X_1	x_1	$u(x_1)$	ν_1	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	ν_2	c_2	$u_2(y)$
...
X_N	x_N	$u(x_N)$	ν_N	c_N	$u_N(y)$
Вимірювана величина	Значення вимірюваної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число степенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
Y	y	$u_c(y)$	ν_{eff}	k	U

Усі величини повинні наводитися у бюджеті із зазначенням одиниць вимірювання.

5.4. Основні методи калібрування і процедури оцінювання невизначеності вимірювань [54]

5.4.1. Калібрування вимірювального приладу

5.4.1.1. Пряме вимірювання ВП, що калібрується, величини, яка відтворюється еталонною ММ

Схема калібрування для цього випадку наведена на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Схема прямого вимірювання ВП, що калібрується, величини, що відтворюється еталонною ММ

При реалізації цієї схеми систематична похибка ВП, що калібрується Δ , в точці калібрування визначається за формулою:

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - (X_s + \Delta_s), \quad (5.19)$$

де X_c – величина, яка вимірюється ВП, що калібрується; Δ_c – поправка на похибку квантування (відліку) ВП, що калібрується; X_s – величина, що відтворюється еталонною ММ; Δ_s – поправка на сумарну додаткову похибку еталонної ММ, пов’язану з дрейфом відтворюваного нею значення з часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації, впливом на значення, що відтворюється ММ, ВП, що калібрується, та ін.

При багаторазових вимірюваннях значення X_c визначається як середнє арифметичне результатів n показань x_{cq} :

$$x_c = \bar{x}_c = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_{cq}. \quad (5.20)$$

Оцінка значення, що відтворюється еталонною ММ, X_s , береться з її сертифіката калібрування.

Зазвичай Δ_c та Δ_s є центрованими величинами (з оціненими значеннями $\hat{\Delta}_c$ і $\hat{\Delta}_s$, які дорівнюють нулю).

Тому оцінка систематичної похибки ВП, що калібрується, дорівнюватиме:

$$\hat{\Delta} = x_c - x_s. \quad (5.21)$$

Вхідним величинам рівняння (5.19) відповідають такі стандартні невизначеності:

– стандартна невизначеність, яка пов’язана зі спостережуваною мінливістю показів ВП, що калібрується, яка оцінюється за типом A при виконанні багаторазових вимірювань:

$$u_A(\bar{x}_c) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{q=1}^n (x_{cq} - \bar{x}_c)^2}; \quad (5.22)$$

– стандартна невизначеність відліку ВП, що калібрується, у припущенні про рівномірний закон розподілу:

$$u_B(\hat{\Delta}_c) = \frac{d}{2\sqrt{3}}, \quad (5.23)$$

де d – дискретність відліку;

– стандартна інструментальна невизначеність еталонної міри, яка отримана із значень розширеної невизначеності $U(x_s)$ та коефіцієнта охоплення k_s , зазначених у сертифікаті калібрування:

$$u_B(x_s) = \frac{U(x_s)}{k_s}; \quad (5.24)$$

– стандартна невизначеність поправки $\hat{\Delta}_s$ в припущенні про рівномірний закон розподілу її всередині границь $\pm\theta_s$:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \frac{\theta_s}{\sqrt{3}}. \quad (5.25, a)$$

або при оцінюванні її за значеннями еталонної міри x_{si} , взятими з L останніх її сертифікатів калібрування:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (x_{si} - \bar{x}_s)^2}, \quad \bar{x}_s = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_{si}. \quad (5.25, б)$$

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання систематичної похибки ВП, що калібрується, яка дорівнюватиме:

$$u_c(\hat{\Delta}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_c) + u_B^2(\hat{\Delta}_c) + u_B^2(x_s) + u_B^2(\hat{\Delta}_s)}. \quad (5.26)$$

Ефективне число степенів свободи v_{eff} для цього випадку визначатиметься за формулою:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(\hat{\Delta})}{\frac{u_A^4(\bar{x}_c)}{n-1} + \frac{u_B^4(x_s)}{v_s} + \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_s)}{L-1}}, \quad (5.27)$$

де v_s число степенів свободи, взятє з сертифікату калібрування еталонної ММ.

Бюджет невизначеності для даного випадку наведено в табл. 5.5.

5.4.1.2. Звірення ВП, що калібрується, та еталонного ВП за допомогою пристрою порівняння

Схема калібрування для цього випадку наведена на рис. 5.3.

Як джерело сигналу вимірювальної інформації для обох ВП виступає пристрій порівняння (ПП).

Таблиця 5.5

Бюджет невизначеності прямих вимірювань ВП, що калібрується, величини, яка відтворюється еталонною ММ

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності
X_c	(5.20)	(5.22)	$n - 1$	1	$u_A(\bar{x}_c)$
Δ_c	0	(5.23)	∞	1	$u_B(\Delta_c)$
X_s	x_s	(5.24)	ν_s	-1	$-u_B(x_s)$
Δ_s	0	(5.25)	$\infty, (L-1)$	-1	$-u_B(\Delta_s)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число степенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
Δ	(5.21)	(5.26)	(5.27)	$t_{0,9545}(\nu_{eff})$	(5.14)

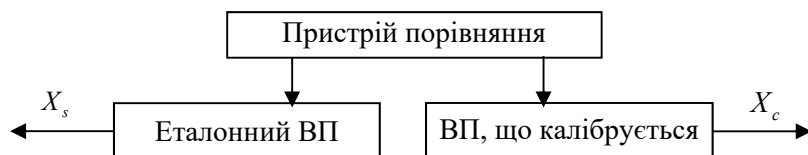


Рис. 5.3. Схема зв'язування ВП, що калібрується та еталонного ВП

Моделне рівняння для цього випадку калібрування має вигляд:

$$\Delta = (X_c + \Delta_c) - (X_s + \Delta_s) + \Delta_{\text{пп}}, \quad (5.28)$$

де X_c , X_s – величини, що вимірюються, ВП, що калібрується та еталонним ВП, відповідно; Δ_c – поправка на похибку квантування (відліку) ВП, що калібрується; Δ_s – поправка на сумарну додаткову похибку еталона, пов'язану з дрейфом значення з часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації та ін; $\Delta_{\text{пп}}$ – нееквівалентність за-

вдання ПП значень вхідних величин для ВП, що калібрується та еталонного ВП.

При багаторазових вимірюваннях оцінки X_c та X_s визначаються як середні арифметичні при числі вимірювань, відповідно n_c та n_s :

$$\bar{x}_c = \frac{1}{n_c} \sum_{q=1}^{n_c} x_{cq}, \quad (5.29)$$

$$\bar{x}_s = \frac{1}{n_s} \sum_{q=1}^{n_s} x_{sq}. \quad (5.30)$$

Зазвичай Δ_c , Δ_s та $\Delta_{\text{ПП}}$ розглядають як центровані випадкові величини (з оціненими значеннями $\hat{\Delta}_c$, $\hat{\Delta}_s$ та $\hat{\Delta}_{\text{ПП}}$, які дорівнюють нулю).

Тому оцінка систематичної похибки ВП, що калібрується дорівнюватиме:

$$\hat{\Delta} = \bar{x}_c - \bar{x}_s. \quad (5.31)$$

Вхідним величинам рівняння (5.28) відповідають такі стандартні невизначеності:

– стандартна невизначеність, що пов'язана зі спостережуваною мінливістю показів ВП, що калібрується, яка оцінюється за типом *A* при виконанні багаторазових вимірювань:

$$u_A(\bar{x}_c) = \sqrt{\frac{1}{n_c(n_c-1)} \sum_{q=1}^{n_c} (x_{cq} - \bar{x}_c)^2}; \quad (5.32)$$

– стандартна невизначеність відліку ВП, що калібрується, у припущенні про рівномірний закон розподілу, дорівнює:

$$u_B(\hat{\Delta}_c) = \frac{d}{2\sqrt{3}}, \quad (5.33)$$

де d – дискретність відліку;

– стандартна невизначеність, що пов'язана з розсіюванням показів еталонного ВП, що спостерігається, яка оцінюється за типом *A* при виконанні багаторазових вимірювань:

$$u_A(\bar{x}_s) = \sqrt{\frac{1}{n_s(n_s-1)} \sum_{q=1}^{n_s} (x_{sq} - \bar{x}_s)^2}; \quad (5.34)$$

– стандартна інструментальна невизначеність еталонного ВП, яка отримана із значень розширеної невизначеності $U(x_s)$ та коефіцієнта охоплення k_s , зазначених у сертифікаті калібрування:

$$u_B(x_s) = \frac{U(x_s)}{k_s}; \quad (5.35)$$

– стандартна невизначеність поправки $\hat{\Delta}_s$ у припущенні про рівномірний закон розподілу її всередині границь $\pm\theta_s$:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \frac{\theta_s}{\sqrt{3}}. \quad (5.36,a)$$

– або при оцінюванні її за значеннями зміщення еталонного ВП, взятими з L останніх його сертифікатів калібрування:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (\hat{\Delta}_{si} - \bar{\Delta}_s)^2}, \quad \bar{\Delta}_s = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \hat{\Delta}_{si}; \quad (5.36,b)$$

– стандартна невизначеність $\hat{\Delta}_{\text{III}}$ у припущенні про рівномірний закон розподілу її всередині границь $\pm\theta_{\text{III}}$:

$$u_B(\hat{\Delta}_{\text{III}}) = \frac{\theta_{\text{III}}}{\sqrt{3}}. \quad (5.37)$$

– сумарна стандартна невизначеність вимірювання зміщення ВП, що калібрується, яка дорівнюватиме:

$$u_c(\hat{\Delta}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_c) + u_B^2(\hat{\Delta}_c) + u_A^2(\bar{x}_s) + u_B^2(\bar{x}_s) + u_B^2(\hat{\Delta}_s) + u_B^2(\hat{\Delta}_{\text{III}})}. \quad (5.38)$$

– ефективне число степенів свободи ν_{eff} для цього випадку дорівнюватиме:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\hat{\Delta})}{\frac{u_A^4(\bar{x}_c)}{n_c - 1} + \frac{u_A^4(\bar{x}_s)}{n_s - 1} + \frac{u_B^4(x_s)}{\nu_s} + \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_s)}{L - 1}}. \quad (5.39)$$

При одночасному вимірюванні еталонним ВП і ВП, що калібрується, величини, яка відтворюється пристроєм порівняння, може виникнути кореляція, що спостерігається між їх показами. У цьому випадку сумарна стандартна невизначеність вимірювання зміщення ВП, що калібрується, дорівнюватиме:

$$u_c(\hat{\Delta}) = \sqrt{[u_A^2(\bar{x}_c) + u_A^2(\bar{x}_s) - 2r_{c,s}u(\bar{x}_c)u(\bar{x}_s)] + u_B^2(x_s) + u_B^2(\hat{\Delta}_c) + u_B^2(\hat{\Delta}_s) + u_B^2(\hat{\Delta}_{\text{III}})}, \quad (5.40)$$

де $r_{c,s}$ коефіцієнт кореляції, що спостерігається, розрахований за показаннями еталонного ВП та ВП, що калібрується:

$$r_{c,s} = \frac{\sum_{q=1}^n (x_{cq} - \bar{x}_c)(x_{sq} - \bar{x}_s)}{\sqrt{\sum_{q=1}^n (x_{cq} - \bar{x}_c)^2 \sum_{i=1}^n (x_{sq} - \bar{x}_s)^2}}, \quad (5.41)$$

причому $n = n_c = n_s$.

Ефективне число степенів свободи v_{eff} для цього випадку буде дорівнювати:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(\hat{\Delta})}{\frac{[u_A^2(\bar{x}_c) + u_A^2(\bar{x}_s) - 2r_{c,s}u_A(\bar{x}_c)u_A(\bar{x}_s)]^2}{n-1} + \frac{u_B^4(\bar{x}_s)}{v_s} + \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_s)}{L-1}}. \quad (5.42)$$

Бюджет невизначеності для розглянутого випадку наведено у табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Бюджет невизначеності вимірювань при звірненні ВП, що калібрується та еталонного ВП за допомогою ПП

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності
X_c	(5.29)	(5.32)	$n_c - 1$	1	$u_A(\bar{x}_c)$
Δ_c	0	(5.33)	∞	1	$u_B(\Delta_c)$
X_s	(5.30)	(5.34)	$n_s - 1$	-1	$-u_A(\bar{x}_s)$
		(5.35)	v_s	-1	$-u_B(x_s)$
Δ_s	0	(5.36)	$\infty, (L-1)$	-1	$-u_B(\Delta_s)$
$\Delta_{ПП}$	0	(5.37)	∞	1	$u_B(\Delta_{ПП})$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число степенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
Δ	(5.31)	(5.38),(5.40)	(5.39),(5.42)	$t_{0,9545}(v_{eff})$	(5.14)

5.4.2. Калібрування матеріальної міри

5.4.2.1. Пряме вимірювання еталонним ВП величини, яка відтворюється ММ, що калібрується

Схема калібрування для цього випадку наведена на рис. 5.4.

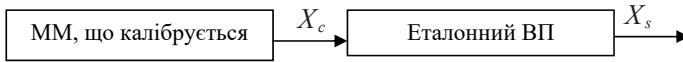


Рис. 5.4. Схема прямого вимірювання еталонним ВП величини, яка відтворюється ММ, що калібрується

Моделльне рівняння для цього випадку має вигляд:

$$X_c = X_s + \Delta_s, \quad (5.43)$$

де X_c – величина, яка відтворюється ММ, що калібрується; X_s – величина, що вимірюється еталонним ВП; Δ_s – сумарна додаткова похибка еталонного ВП, яка пов’язана з дрейфом значення з часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації та ін.

При багаторазових вимірюваннях оцінка X_s визначається як середнє арифметичне при числі вимірювань n_s :

$$\bar{x}_s = \frac{1}{n_s} \sum_{q=1}^{n_s} x_{sq} \quad (5.44)$$

Зазвичай Δ_s розглядають як центровану випадкову величину (з оцінкою $\hat{\Delta}_s = 0$).

Тому оцінка значення величини x_c , яка відтворюється ММ, що калібрується, буде дорівнювати:

$$x_c = x_s. \quad (5.45)$$

Вхідним величинам рівняння (5.43) відповідають такі стандартні невизначеності:

– стандартна невизначеність, яка пов’язана з розсіюванням показів еталонного ВП, що оцінюється за типом A при виконанні багаторазових вимірювань:

$$u_A(\bar{x}_s) = \sqrt{\frac{1}{n_s(n_s - 1)} \sum_{q=1}^{n_s} (x_{sq} - \bar{x}_s)^2}; \quad (5.46)$$

– стандартна інструментальна невизначеність еталонного ВП, яка отримана із значень розширеної невизначеності $U(x_s)$ та коефіцієнта охоплення k_s , зазначених у сертифікаті калібрування:

$$u_B(x_s) = \frac{U(x_s)}{k_s}; \quad (5.47)$$

– стандартна невизначеність поправки $\hat{\Delta}_s$ в припущенні про рівномірний закон розподілу її всередині границь $\pm\theta_s$:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \frac{\theta_s}{\sqrt{3}}. \quad (5.48,а)$$

або при оцінюванні її за значеннями похибки еталонного ВП $\hat{\Delta}_{si}$, взятих з останніх L його сертифікатів калібрування:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (\hat{\Delta}_{si} - \bar{\Delta}_s)^2}, \quad \bar{\Delta}_s = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \hat{\Delta}_{si}. \quad (5.48,б)$$

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання значення x_c , яке відтворюється мірою, що калібрується, буде дорівнювати:

$$u_c(x_c) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}_s) + u_B^2(x_s) + u_B^2(\hat{\Delta}_s)}. \quad (5.49)$$

Ефективне число степенів свободи для цього випадку визначатиметься за формулою:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(x_c)}{\frac{u_A^4(\bar{x}_s)}{n-1} + \frac{u_B^4(x_s)}{v_s} + \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_s)}{L-1}}. \quad (5.50)$$

Бюджет невизначеності при цьому випадку наведено у табл. 5.7.

5.4.2.2. Звірення значень, які відтворюються ММ, що калібрується, та еталонною ММ за допомогою компаратора

При звірванні двох ММ використовується допоміжний ЗВТ – компаратор (засіб порівняння, що призначений для звірвання мір однорідних величин). Схема передачі розміру одиниці з допомогою компаратора наведена на рис. 5.8.

Таблиця 5.7

Бюджет невизначеності прямих вимірювань еталонним ВП величини, яка відтворюється ММ, що калібрується

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності
X_s	(5.44)	(5.46)	$n - 1$	1	$u_A(\bar{x}_s)$
		(5.47)	v_s	1	$u_B(x_s)$
Δ_s	0	(5.48)	$\infty, (L-1)$	1	$u_B(\hat{\Delta}_s)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число степенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
X_c	(5.45)	(5.49)	(5.50)	$t_{0,9545}(v_{eff})$	(5.14)

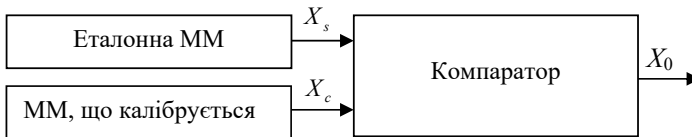


Рис. 5.5. Схема зв'язування ММ, що калібрується та еталонної ММ за допомогою компаратора

Модельне рівняння для цього випадку калібрування має вигляд:

$$X_c = (X_s + \Delta_s) + (X_0 + \Delta_0), \quad (5.51)$$

де X_c – величина, яка відтворюється ММ, що калібрується; X_s – величина, яка відтворюється еталонною ММ; Δ_s – поправка на сумарну похибку еталонної ММ, пов'язану з дрейфом значення з часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації та ін; X_0 – величина, яка виміряна компаратором; Δ_0 – поправка на сумарну похибку компаратора, пов'язану з дрейфом значення від часу останнього калібрування, відхиленнями в умовах експлуатації та ін.

При багаторазових вимірюваннях оцінка X_0 визначається як середнє арифметичне результатів n його показів X_{0q} :

$$x_0 = \bar{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_{0q} . \quad (5.52)$$

Оцінка значення еталонної ММ, що відтворюється x_s , береться з сертифіката калібрування еталонної міри.

Зазвичай Δ_s і Δ_0 розглядають як центровані випадкові величини (з оціненими значеннями $\hat{\Delta}_s$ і $\hat{\Delta}_0$, що дорівнюють нулю).

Тому оцінка значення величини x_c , яка відтворюється ММ, що калібрується, буде дорівнювати:

$$x_c = x_s + x_0. \quad (5.53)$$

Вхідним величинам рівняння (5.51) відповідають такі стандартні невизначеності:

– стандартна невизначеність калібрування еталонної ММ, яка отримана із значень розширеної невизначеності $U(x_s)$ та коефіцієнта охолодження k_s , зазначених у сертифікаті калібрування:

$$u_B(x_s) = \frac{U(x_s)}{k_s} ; \quad (5.54)$$

– стандартна невизначеність поправки $\hat{\Delta}_s$ в припущенні про рівномірний закон розподілу її всередині границь $\pm\theta_s$:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \frac{\theta_s}{\sqrt{3}} . \quad (5.55,а)$$

– або при оцінюванні її за значеннями еталонної ММ x_{si} , взятими з останніх її L_s сертифікатів калібрування:

$$u_B(\hat{\Delta}_s) = \sqrt{\frac{1}{L_s - 1} \sum_{i=1}^{L_s} (x_{si} - \bar{x}_s)^2} , \quad \bar{x}_s = \frac{1}{L_s} \sum_{i=1}^{L_s} x_{si} ; \quad (5.55,б)$$

– стандартна невизначеність, яка пов'язана з розсіюванням показів компаратора x_{0q} , що оцінюється за типом A при виконанні багаторазових вимірювань:

$$u_A(x_0) = u_A(\bar{x}_0) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{q=1}^n (x_{0q} - \bar{x}_0)^2}; \quad (5.56)$$

– стандартна невизначеність калібрування компаратора, яка отримана із значень розширеної невизначеності $U(x)$ та коефіцієнта охоплення k_0 , зазначених у сертифікаті калібрування:

$$u_B(x_0) = \frac{U(x_0)}{k_0}; \quad (5.57)$$

– стандартна невизначеність похибки $\hat{\Delta}_0$ в припущенні про рівномірний закон розподілу її всередині границь $\pm\theta_0$:

$$u(\Delta_0) = \frac{\theta_0}{\sqrt{3}}. \quad (5.58, a)$$

або при оцінюванні її за значеннями похибки компаратора $\hat{\Delta}_{0i}$, взятими з останніх L_0 сертифікатів калібрування:

$$u_B(\hat{\Delta}_0) = \sqrt{\frac{1}{L_0 - 1} \sum_{i=1}^{L_0} (\hat{\Delta}_{0i} - \bar{\Delta}_0)^2}, \quad \bar{\Delta}_0 = \frac{1}{L_0} \sum_{i=1}^{L_0} \hat{\Delta}_{0i}. \quad (5.58, b)$$

– стандартна невизначеність вимірювання значення x_c , яка відтворюється ММ, що калібрується, дорівнюватиме:

$$u_c(x_c) = \sqrt{u^2(x_s) + u^2(\hat{\Delta}_s) + u_A^2(\bar{x}_0) + u_B^2(x_0) + u^2(\hat{\Delta}_0)}. \quad (5.59)$$

– ефективне число степенів свободи для цього випадку визначатиметься за формулою:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(\hat{\Delta})}{\frac{u_B^4(x_s)}{v_s} + \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_s)}{L_s - 1} + \frac{u_A^4(\bar{x}_0)}{n - 1} + \frac{u_B^4(x_0)}{v_0} + \frac{u_B^4(\hat{\Delta}_0)}{L_0 - 1}}. \quad (5.60)$$

Бюджет невизначеності для даного випадку наведено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Бюджет невизначеності вимірювань при звірванні ММ,
що калібрується, та еталонної ММ за допомогою компаратора

Вхідна величина	Оцінка вхідної величини	Стандартна невизначеність	Число степенів свободи	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності
X_s	x_s	(5.54)	ν_s	1	$u(x_s)$
Δ_s	0	(5.55)	$\infty, (L-1)$	1	$u(\hat{\Delta}_s)$
X_0	(5.52)	(5.56)	$n - 1$	1	$u_A(\bar{x}_0)$
		(5.57)	ν_0	1	$u_B(\bar{x}_0)$
Δ_0	0	(5.58)	$\infty, (L-1)$	1	$u(\Delta_0)$
Вихідна величина	Оцінка вихідної величини	Сумарна стандартна невизначеність	Ефективне число степенів свободи	Коефіцієнт охоплення	Розширена невизначеність
X_c	(5.53)	(5.59)	(5.60)	$t_{0,9545}(\nu_{eff})$	(5.14)

5.5. Висновки до розділу 5

1. Результат вимірювання, який виконаний в лабораторії, що є акредитованою за стандартом [52], повинен бути простежуваним до одиниці SI (відповідної сталої), тобто співвіднесений з еталомом через документовані безперервний ланцюг калібрувань.

2. Лабораторія повинна мати програму та процедури калібрування всіх наявних ЗВТ та обладнання. Під час створення програм та процедур необхідно вказувати невизначеність вимірювань.

3. Вимірюваною величиною при калібруванні ВП є його систематична похибка, а при калібруванні ММ – її значення. Числовим значенням вимірюваної величини після калібрування ВП є зміщення (оцінка систематичної похибки), а після калібрування ММ – її дійсне значення.

4. В повному запису результату вимірювань при калібруванні разом з оцінками вимірюваної величини необхідно вказувати розширену невизначеність, яка розраховується для рівня довіри 0,9545 (приблизно 0,95).

5. Розширена невизначеність вимірювань є добутком сумарної стандартної невизначеності та коефіцієнта охоплення, значення якого залежить від виду розподілу ймовірностей вихідної величини в моделі вимірювань і обраної ймовірності охоплення.

6. Процедура оцінювання невизначеності вимірювань містить в собі бюджет невизначеності, який включає оцінки та невизначеності вимірювань, пов'язані з величинами, що входять до моделі вимірювань, коваріації, види застосовуваних функцій щільності ймовірностей, число степенів свободи, тип оцінювання невизначеності та коефіцієнт охоплення.

5.6. Контрольні питання до розділу 5

1. Що таке метрологічна простежуваність та як вона забезпечується?
2. Що таке калібрування ЗВТ та чим воно відрізняється від повірки?
3. Чим відрізняється випадкова похибка від систематичної?
4. Чим відрізняються стандартні невизначеності типу A і типу B ?
5. Чим відрізняються стандартна і розширена невизначеності?
6. Як враховують кореляцію між вхідними величинами при оцінюванні сумарної стандартної невизначеності?
7. Як визначають розширену невизначеність та від яких факторів залежить коефіцієнт охоплення?
8. Наведіть схему та модель прямого вимірювання ВП, що калібрується, величини, яка відтворюється еталонною ММ, та поясніть значення її вхідних величин.
9. Наведіть схему та модель звірення ВП, що калібрується, та еталонного ВП за допомогою пристрою порівняння та поясніть значення її вхідних величин.
10. Наведіть схему та модель прямого вимірювання еталонним ВП величини, яка відтворюється ММ, що калібрується, та поясніть значення її вхідних величин.
11. Наведіть схему та модель звірення ММ, що калібрується та еталонної ММ за допомогою компаратора та поясніть значення її вхідних величин.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

1. Однією з систем, яка необхідна для успішного функціонування країни, є система забезпечення єдності і простежуваності вимірювань, складовими якої є нормативно-правова, організаційна, наукова та технічна основи. Така система створена і в Україні (розділ 1).

2. Необхідною умовою забезпечення єдності вимірювань (ЗЄВ) є функціонування в країні єдиної системи одиниць ФВ. В Україні відповідно до Закону “Про метрологію і метрологічну діяльність” діє Міжнародна система одиниць SI.

3. У 2019 р. в систему SI внесені суттєві зміни, тому в Україні діє SI у версії 2019 р. (розділ 2).

4. Одним з найважливіших елементів системи ЗЄВ є еталонна база (розділ 3), а основу еталонної бази складають еталони основних одиниць (розділ 4). У відповідності до SI-2019 відбулись суттєві зміни у визначеннях і в методології відтворення цих одиниць, що відображено в розділі 4 посібника.

5. Практична діяльність з простежуваності вимірювань виконується за допомогою процедур калібрування, що відображено в розділі 5 посібника.

ЛІТЕРАТУРА

1. Забезпечення єдності електрорадіовимірювань: навч. посібник / Ю.Ф. Павленко, І.П. Захаров, С.І. Кондрашов, В.К. Гусельніков; за ред. Ю. Ф. Павленко – Х.: Підручник НТУ «ХПІ», 2011. – 232 с.
2. Забезпечення єдності електрорадіовимірювань: підручник / Ю.Ф. Павленко, І.П. Захаров, С.І. Кондрашов, В.К. Гусельніков; за ред. Ю. Ф. Павленка. – Х.: Підручник НТУ «ХПІ», 2014. – 236 с.
3. Resolution 1 On the revision of the International System of Units // General Conference on Weights and Measures. Proceedings of the 26th meeting of the CGPM. BIPM, 2018, pp. 472-474.
4. SI Brochure: The International System of Units (SI). 9th edition 2019. Breteuil Pavilion, F-92312 Sèvres Cedex, France: BIPM – 220 p.
5. Вступ до квантової метрології: навчальний посібник / Ю.Ф. Павленко, С.І. Кондрашов, П.І. Несжмаков, Н.М. Маслова; за ред. Ю.Ф. Павленка. – Харків: Підручник НТУ “ХПІ”, 2013. – 148 с.
6. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність”. Відомості Верховної Ради, 2014, № 30, ст.1008.
7. ISO/IEC Guide 99:2007, International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), ISO/IEC, Geneva, 2007, 108 p.
8. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення. К.: Держстандарт України, 68 с.
9. Закон України “Про стандартизацію”. Відомості Верховної Ради, 2014, № 31, ст.1058.
10. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки. – Харків: НТУ ХПІ, 2005. – 524 с.
11. ILAC P10:01/2013 ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results.
12. Про затвердження Положення про Службу стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів. Постанова Кабінету Міністрів України № 663 від 2 вересня 2015 р. Київ, 2015.
13. ISO 80000-1:2022 Quantities and units. Part 1: General.

14. Кохзик М. Національні метрологічні інститути на шляху до нового тисячоліття // Український метрологічний журнал, 2000. Вип. 3. – С. 5-9.

15. Закон України “Про приєднання України до Метричної конвенції”. Відомості Верховної Ради, 2018, № 23, ст.210.

16. Quantum Metrology and Fundamental Physical Constants // Proceedings of a NAT O Advanced Study Institute, Erice, Sicily, Italy November 16-28, 1981, 655 p.

17. Planck M. Über irreversible Strahlungsvorgänge // Sitzungsberichte der Koniglich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Vol. 5., 1899, pp. 440-480.

18. Yavorsky B.M., Pinsky A.A. Fundamentals of Physics, Vol 1., 1975, 536 p.

19. Yavorsky B.M., Pinsky A.A. Fundamentals of Physics, Vol. 2. –1975, 482 p.

20. Stephen Hawking. The Universe of Stephen Hawking. Three Books on Space and Time (Stephen Hawking Universe), Bantam Books, 2007, 464 p.

21. Danin D. Probabilities of the Quantum World. 1983, 270 p.

22. Bohr Niels. Atomic Physics and human Knowledge. Dover publications, Inc.Mineola, New York, 1961, 115 p.

23. Taylor B.N., Parker W.H., Langenberg, D.N. The fundamental constants and quantum electrodynamics. London: Academic press, 1969, 353 p.

24. Heisenberg W. Schrödinger E., Dirac P.A.M. Modern quantum mechanics. Three Nobel reports. Technico-theoretical state press, 1934, 76 p.

25. Quantum Metrology. Foundation of Units and Measurements by Ernst O. Goebel, Uwe Siegner (z-lib.org). 2015. – New York, Willey.

26. Вступ до квантової метрології: підручник / Ю.Ф. Павленко, С.І. Кондрашов, П.І. Неєжмаков та ін.; за ред. Ю.Ф. Павленка. –Харків: ФОП Мезіна В.В., 2017. – 244 с.

27. Вступ до квантової метрології: Частина 2. Елементи квантової фізики, практичні заняття: навчальний посібник / Ю. Ф. Павленко, П.І. Неєжмаков, С.І. Кондрашов, Т.В. Дроздова: Вид-во „Підручник НТУ ХПІ”, 2019. – 115 с.

28. Josephson B.D. Possible New Effects in Superconductive Tunnelling // Physics Letters, 1962. – Vol. 1. – No. 7, pp. 251-251.

29. Klitzing K. New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance / K. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // Physics Rev. Lett. – 1980. – V. 45. – № 6. – pp. 494 – 497.

30. Purcell E.M., Torrey H.C., Pound R.V. Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid // Physical Review. – 1946. – V. 69. – pp. 37-38.
31. Bloch F., Hansen W.W., Packar M. Nuclear Induction // Physical Review. – 1946. – V. 69 – p. 127.
32. Likharev K. Single-electron devices and their applications // Proc. of the IEEE. – 1999. – V.87, pp. 606-632.
33. OIML D 8:2004 Measurement standards. Choice, recognition, use, conservation and documentation. 2004. Paris: OIML, 16 p.
34. ДСТУ OIML D 8:2008 Метрологія. Еталони. Вибір, визнання, застосування, зберігання та документація (OIML D 8:2004, IDT). 2010. К.: Держспоживстандарт України, 12 с.
35. ДСТУ 3231:2007 Метрологія. Еталони одиниць вимірювань державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування.
36. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM, 2008, 90 p.
37. Клейман О.С., Оголюк В.П., Сидоренко Г.С. та ін. Державний первинний еталон одиниці часу і частоти // Український метрологічний журнал, 1997, – вип. 3. – С. 18–23.
38. SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2. Mise en pratique for the definition of the second in the SI.
39. Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology // Nature Photon. – 2011. – № 5. – P. 203–210.
40. Мачехін Ю.П., Негрійко О.М., Соловйов В.С., Яценко Л.П. Оптичні стандарти частоти, ч.1. Х.: Колегіум, 2010, 144 с.
41. Зімокосов Г.А., Мачехін Ю.П., Оголюк В.П. та ін. Державний первинний еталон одиниці довжини // Український метрологічний журнал, 2001, – вип. 4. – С. 39–45.
42. SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2. Mise en pratique for the definition of the metre in the SI.
43. SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2. Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI.
44. Назаренко Л.А. Температурна метрологія у ХДНДІМ //Український метрологічний журнал – 1996. – Вип.4. – С. 33 – 37.

45. SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2. Mise en pratique for the definition of the kelvin in the SI.

46. Назаренко Л.А. Еталонна фотометрія (Еволюція одиниць та Метрична конвенція) // Український метрологічний журнал – 2000. – Вип.1. – С. 29 – 35.

47. Назаренко Л.А., Несжмаков П.І., Тимофесв Є.П. Квантова радіометрія та фотометрія//Український метрологічний журнал.–2012.–№ 1. – С. 30–35.

48. Fox N.P. Trap detectors and their properties // Metrologia. – 1991. – Vol. 28. – № 3. – pp. 197–202.

49. SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2. Mise en pratique for the definition of the candela and associated derived units for photometric and radiometric quantities in the SI.

50. SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2. Mise en pratique for the definition of the mole in the SI.

51. SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2. Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI.

52. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

53. IEC 60050-300:2001. International Electrotechnical Vocabulary – Electrical and electronic measurements and measuring instruments – Part 311: General terms relating to measurements – Part 312: General terms relating to electrical measurements – Part 313: Types of electrical measuring instruments – Part 314: Specific terms according to the type of instrument.

54. Zakharov I.P., Vodotyka S.V., Shevchenko E.N Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration // Measurement Techniques, 2011, Volume: 54 Issue: 4, pp. 387-399.

55. EA-4/02 M: 2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration.

56. M3003:2012 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. Edition 3.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця Д.1.1

Не-SI одиниці, прийняті для використання разом із SI

Величина	Назва одиниці	Позначення одиниці	Значення в одиницях SI
Час	хвилина	min	1 min = 60 s
	година	h	1 h = 60 min = 3600 s
	день	d	1 d = 24 h = 86 400 s
Довжина	астрономічна одиниця	au	1 au = 149 597 870 700 m
Площинний та фазовий кути	градус	°	1° = (π/180) rad
	хвилина	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
	секунда	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
Площа	гектар	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
Об'єм	літр	l, L	1 l = 1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
Маса	тонна	t	1 t = 10 ³ kg
	дальтон	Da	1 Da = 1,660 539040(20) × 10 ⁻²⁷ kg
Енергія	електрон-вольт	eV	1 eV = 1,602 176 634 × 10 ⁻¹⁹ J
Логарифмічні співвідношення величин	непер	Np	$A(\text{Np}) = \ln(V_1/V_2) = 0,5 \cdot \ln(P_1/P_2)$
	бел	B	$A(\text{B}) = \lg(P_1/P_2) = 2 \cdot \lg(V_1/V_2)$
	децибел	dB	$A(\text{dB}) = 10 \cdot \lg(P_1/P_2) = 20 \cdot \lg(V_1/V_2)$

Таблиця Д.1.2

Приклади когерентних похідних одиниць SI,
назви й позначення яких включають когерентні похідні одиниці SI
зі спеціальними назвами й позначеннями

Похідна величина	Назва когерентної похідної одиниці	Позначення	Похідна одиниця, виражена через основні
Динамічна в'язкість	паскаль секунда	Pa·s	kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Момент сили	ньютон метр	N·m	kg·m ² ·s ⁻²
Поверхнева напруга	ньютон за метр	N·m ⁻¹	kg·s ⁻²
Кутова швидкість, кутова частота	радіан за секунду	rad·s ⁻¹	s ⁻¹
Кутове прискорення	радіан за секунду квадратну	rad·s ⁻²	s ⁻²
Густина теплового потоку, опроміненість	ват за метр квадратний	W·m ⁻²	kg·s ⁻³
Теплоємність, ентропія	джоуль за кельвін	J·K ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
Питома теплоємність, питома ентропія	джоуль за кілограм-кельвін	J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹	m ² ·s ⁻² ·K ⁻¹
Питома енергія	джоуль за кілограм	J·kg ⁻¹	m ² ·s ⁻²
Теплопровідність	ват за метр-кельвін	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	kg·m·s ⁻³ ·K ⁻¹
Густина енергії	джоуль за метр кубічний	J·m ⁻³	kg·m ⁻¹ ·s ⁻²
Напруженість електричного поля	вольт за метр	V·m ⁻¹	kg·m·s ⁻³ ·A ⁻¹
Густина електричного заряду	кулон за метр кубічний	C·m ⁻³	A·s·m ⁻³
Поверхнева густина електричного заряду	кулон за метр квадратний	C·m ⁻²	A·s·m ⁻²
Густина електричного потоку, електричне зміщення	кулон за метр квадратний	C·m ⁻²	A·s·m ⁻²
Діелектрична проникність	фарад за метр	F·m ⁻¹	kg ⁻¹ ·m ⁻³ ·s ⁴ ·A ²
Магнітна проникність	генрі за метр	H·m ⁻¹	kg·m·s ⁻² ·A ⁻²
Молярна енергія	джоуль за моль	J·mol ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻² ·mol ⁻¹
Молярна ентропія, молярна теплоємність	джоуль за моль-кельвін	J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻² ·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
Експозиційна доза (рентгенівських і γ-променів)	кулон за кілограм	C·kg ⁻¹	A·s·kg ⁻¹
Потужність поглинутої дози	грей за секунду	Gy·s ⁻¹	m ² ·s ⁻³
Сила випромінювання	ват за стерадіан	W·sr ⁻¹	kg·m ² ·s ⁻³
Енергетична яскравість	ват за метр квадратний-стерадіан	W·sr ⁻¹ ·m ⁻²	kg·s ⁻³
Концентрація каталітичної активності	катал за метр кубічний	kat·m ⁻³	mol·s ⁻¹ ·m ⁻³

Додаток 2

Таблиця Д.2.1

Значення коефіцієнтів Стьюдента для ймовірності 0,9545
та дробового числа ступенів свободи

v_{eff}	$t_{0,9545; v_{eff}}$	v_{eff}	$t_{0,9545; v_{eff}}$	v_{eff}	$t_{0,9545; v_{eff}}$
1,0	13,968	3,0	3,307	5,0	2,649
1,1	11,203	3,1	3,245	5,1	2,633
1,2	9,364	3,2	3,188	5,2	2,617
1,3	8,074	3,3	3,137	5,3	2,603
1,4	7,131	3,4	3,089	5,4	2,589
1,5	6,418	3,5	3,045	5,5	2,575
1,6	5,864	3,6	3,005	5,6	2,562
1,7	5,424	3,7	2,967	5,7	2,550
1,8	5,067	3,8	2,932	5,8	2,539
1,9	4,773	3,9	2,900	5,9	2,527
2,0	4,527	4,0	2,869	6,0	2,517
2,1	4,318	4,1	2,841	6,1	2,506
2,2	4,140	4,2	2,814	6,2	2,496
2,3	3,985	4,3	2,789	6,3	2,487
2,4	3,850	4,4	2,766	6,4	2,478
2,5	3,732	4,5	2,743	6,5	2,469
2,6	3,627	4,6	2,722	6,6	2,460
2,7	3,534	4,7	2,702	6,7	2,452
2,8	3,450	4,8	2,684	6,8	2,444
2,9	3,375	4,9	2,666	6,9	2,436

Таблиця Д.2.2

Значення коефіцієнтів охоплення для композиції нормального та рівномірного внесків невизначеності

$\frac{u_i(y)_{normal}}{u_i(y)_{rect}}$	$k_{0,9545}$	$\frac{u_i(y)_{normal}}{u_i(y)_{rect}}$	$k_{0,9545}$	$\frac{u_i(y)_{normal}}{u_i(y)_{rect}}$	$k_{0,9545}$
0,00	1,65	0,50	1,84	0,95	1,95
0,10	1,66	0,55	1,85	1,00	1,95
0,15	1,68	0,60	1,87	1,10	1,96
0,20	1,70	0,65	1,89	1,20	1,97
0,25	1,72	0,70	1,90	1,40	1,98
0,30	1,75	0,75	1,91	1,80	1,99
0,35	1,77	0,80	1,92	2,00	1,99
0,40	1,79	0,85	1,93	2,50	2,00
0,45	1,82	0,90	1,94	∞	2,00

Таблиця Д.2.3

Значення коефіцієнтів охоплення для композиції нормального та арксинусного внесків невизначеності

$\frac{u_i(y)_{normal}}{u_i(y)_{arcsine}}$	$k_{0,9545}$	$\frac{u_i(y)_{normal}}{u_i(y)_{arcsine}}$	$k_{0,9545}$	$\frac{u_i(y)_{normal}}{u_i(y)_{arcsine}}$	$k_{0,9545}$
0,00	1,41	0,50	1,77	0,95	1,93
0,10	1,47	0,55	1,80	1,00	1,93
0,15	1,51	0,60	1,82	1,10	1,95
0,20	1,55	0,65	1,84	1,20	1,96
0,25	1,60	0,70	1,86	1,40	1,97
0,30	1,64	0,75	1,88	1,80	1,99
0,35	1,67	0,80	1,89	2,00	1,99
0,40	1,71	0,85	1,90	2,50	2,00
0,45	1,74	0,90	1,92	∞	2,00

Таблиця Д.2.4

Значення коефіцієнтів охоплення для композиції рівномірного
та арксинусного внесків невизначеності

$\frac{u_i(y)_{rect}}{u_i(y)_{arcsine}}$	$k_{0,9545}$	$\frac{u_i(y)_{rect}}{u_i(y)_{arcsine}}$	$k_{0,9545}$	$\frac{u_i(y)_{rect}}{u_i(y)_{arcsine}}$	$k_{0,9545}$
0,00	1,41	0,45	1,75	3,00	1,80
0,10	1,48	0,50	1,78	4,00	1,75
0,15	1,53	0,60	1,82	5,00	1,72
0,20	1,57	0,70	1,86	6,00	1,70
0,25	1,62	0,80	1,88	7,50	1,68
0,30	1,66	0,90	1,89	10,00	1,66
0,35	1,69	1,00	1,90	20,00	1,65
0,40	1,73	2,00	1,86	∞	1,65

Таблиця Д.2.5

Значення коефіцієнтів охоплення для композиції двох рівномірних
або двох арксинусних внесків невизначеності

$\frac{u_i(y)_{smaller}}{u_i(y)_{larger}}$	$k_{0,9545}$ 2 rect	$k_{0,9545}$ 2 arcsine	$\frac{u_i(y)_{smaller}}{u_i(y)_{larger}}$	$k_{0,9545}$ 2 rect	$k_{0,9545}$ 2 arcsine
0,00	1,65	1,41	0,40	1,82	1,72
0,05	1,65	1,44	0,45	1,84	1,75
0,10	1,66	1,49	0,50	1,86	1,77
0,15	1,69	1,53	0,60	1,89	1,81
0,20	1,71	1,58	0,70	1,91	1,83
0,25	1,74	1,62	0,80	1,92	1,85
0,30	1,77	1,66	0,90	1,93	1,86
0,35	1,79	1,69	1,00	1,93	1,86

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень	3
ВСТУП.....	6
1. ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ.....	8
1.1. Поняття єдності вимірювань.....	8
1.2. Міжнародна система одиниць.....	9
1.3 Структура системи забезпечення єдності вимірювань.....	10
1.3.1. Нормативно-правова основа системи ЗЄВ	10
1.3.2. Організаційна основа ЗЄВ	11
1.3.3. Наукова основа ЗЄВ.....	12
1.3.4. Технічна основа системи ЗЄВ.....	13
1.3.4.1. Система державних еталонів.....	14
1.3.4.2. Стандартні зразки властивостей речовин та матеріалів ...	14
1.3.4.3. Сукупність робочих засобів вимірювальної техніки	16
1.3.4.4. Система передачі розміру одиниць	16
1.3.4.5. Стандартні довідкові дані про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів.....	17
1.4. Забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі	18
1.5. Висновки до розділу 1	21
1.6. Контрольні питання	22
2. НОВА SI-2019 – КВАНТОВА SI.....	23
2.1. Дуже коротка історія.....	23
2.2. SI та визначальні сталі.....	24
2.3. Визначення фундаментальних сталей у SI-2019	25
2.4. Визначення одиниць SI-2019	28
2.4.1. Основні одиниці	28
2.4.2. Практична реалізація одиниць SI	34
2.4.3. Розмірності величин.....	35
2.4.4. Похідні одиниці SI	36
2.4.5. Одиниці SI в рамках загальної теорії відносності	38
2.5. Десяткові кратні й частинні одиниць SI	39
2.6. Квантова фізика (механіка) – методична основа Нової SI	40
2.6.1. Елементи квантової фізики	41
2.6.1.1. Квантова формула Планка	41

2.6.1.2. Роботи Ейнштейна і зовнішній фотоэффект	41
2.6.1.3. Моделі атома. Модель і постулати Бора.....	42
2.6.1.4. Подвійна корпускулярно-хвильова природа випромінювання і частинок. Хвилі де Бройля.....	43
2.6.1.5. Хвильова функція Шредінгера.....	44
2.6.1.6. Співвідношення невизначеностей П. Гайзенберга.....	45
2.6.1.7. Принцип Паулі	45
2.6.1.8. Принцип відповідності Бора	46
2.6.2. Квантові явища і ефекти.....	48
2.6.3. Використання квантових явищ у метрології	52
2.6.4. Макроскопічні квантові ефекти.....	52
2.7. Висновки до розділу 2	55
2.8. Контрольні питання до розділу 2	56
3. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ЕТАЛОНІВ	58
3.1. Нормативні документи	58
3.2. Функції еталона.....	58
3.3. Види (класифікація) еталонів	60
3.4. Особливості еталонів у порівнянні з іншими засобами виміральної техніки	62
3.5. Вибір еталона	63
3.5.1. Метрологічні вимоги	63
3.5.2. Технічні вимоги.....	64
3.5.3. Економічні вимоги	65
3.6. Визнання еталона	65
3.7. Застосування еталона	66
3.8. Зберігання еталона	66
3.9. Документація до еталона	67
3.10. Висновки до розділу 3	67
3.11. Контрольні питання до розділу 3.....	68
4. ЕТАЛОНИ ОСНОВНИХ ОДИНИЦЬ СИ	69
4.1. Секунда	69
4.1.1. Коротка історія	69
4.1.2. Атомна секунда.....	70
4.1.3. Реалізація атомної (квантової) секунди	71
4.1.4. Еталон одиниць часу і частоти.....	75
4.1.5. Розвиток технологій квантового генерування	76

4.1.5.1. Цезієвий “фонтан”	76
4.1.5.2. Оптичні стандарти частоти (ОСЧ)	78
4.2. Метр	80
4.2.1. Коротка історія	80
4.2.2. Сучасний первинний еталон одиниці довжини.....	84
4.2.3. Фемтосекундний лазер (“частотна гребінка”).....	86
4.2.4. Технології вимірювання великих і малих довжин	89
4.2.4.1. Великі довжини	89
4.2.4.2. Малі довжини	89
4.3. Ампер	90
4.3.1. Коротка історія	90
4.3.2. Відтворення ампера у SI-2019.....	92
4.3.2.1. Опосередковане відтворення ампера за законом Ома	92
4.3.2.2. Пряме відтворення ампера	93
4.4. Відтворення кілограма у SI-2019.....	95
4.4.1. Коротка історія	95
4.4.2. Реалізація “електричного” кілограма	98
4.4.3. Реалізація “атомного” кілограма (метод “рентгенівської густини кристала”).....	100
4.4.4. Роль і статус міжнародного прототипу	101
4.4.5. Вплив перевизначення кілограма на похідні одиниці	102
4.4.5.1. Вплив на похідні одиниці в механіці	102
4.4.5.2. Вплив на одиниці в інших видах вимірювань	103
4.5. Кельвін	104
4.5.1. Коротка історія	104
4.5.2. Система існуючих еталонів одиниці температури України	105
4.5.3. Перевизначення кельвіна.....	108
4.5.4. Методи первинної термометрії.....	109
4.5.5. Шумова термометрія (термометрія «шуму Джонсона»)	113
4.5.6. Наслідки перевизначення кельвіна. Статус МТШ-90	115
4.6. Кандела	116
4.6.1. Коротка історія	116
4.6.2. Реалізація кандели на основі джерела випромінення	119
4.6.3. Реалізація кандели на основі приймача	120
4.6.4. Перспективи метода, що ґрунтується на рахуванні числа фотонів	122
4.6.5. Еталон одиниці сили світла України	124

4.7. Моль	126
4.7.1. Коротка історія	126
4.7.2. Нове визначення моля.....	127
4.7.3. Наслідки перевизначення моля	127
4.8. Висновки до розділу 4	128
4.9. Контрольні питання до розділу 4	130

5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОСТЕЖУВАНОСТІ

ВИМІРЮВАНЬ	131
5.1. Основні терміни та визначення	131
5.2. Засоби та методи вимірювань, які застосовуються при калібруванні	133
5.3. Оцінювання невизначеності вимірювань	134
5.3.1. Основні терміни та визначення.....	134
5.3.2. Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань.....	136
5.3.3. Складання бюджету невизначеності	143
5.4. Основні методи калібрування і процедури оцінювання невизначеності вимірювань	144
5.4.1. Калібрування вимірювального приладу.....	144
5.4.1.1. Пряме вимірювання ВП, що калібрується, величини, яка відтворюється еталонною ММ	144
5.4.1.2. Звірення ВП, що калібрується, та еталонного ВП за допомогою пристрою порівняння	146
5.4.2. Калібрування матеріальної міри.....	151
5.4.2.1. Пряме вимірювання еталонним ВП величини, яка відтворюється ММ, що калібрується	151
5.4.2.2. Звірення значень, які відтворюються ММ, що калібрується, та еталонною ММ за допомогою компаратора.....	152
5.5. Висновки до розділу 5	156
5.6. Контрольні питання до розділу 5	157

ЗАКЛЮЧЕННЯ	158
-------------------------	-----

ЛІТЕРАТУРА	159
-------------------------	-----

ДОДАТКИ	163
----------------------	-----

Наукове видання

**ПАВЛЕНКО Юрій Федорович,
ЗАХАРОВ Ігор Петрович**

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ**

**Навчальний посібник
Частина 1**

В авторській редакції

Підписано до друку 26.12.2023 р.
Формат 60x84^{1/16}. Папір офсет. Друк офсет.
Умов. друк. арк. 8,14. Обл.-вид. арк. 6,5. Тираж 100 прим.

Видавництво ТОВ «Оберіг»
61140, м. Харків, просп. Гагаріна, 62, к. 97
Свідоцтво про реєстрацію видавничої діяльності
ДК № 3045 від 07.12.2007 р.