

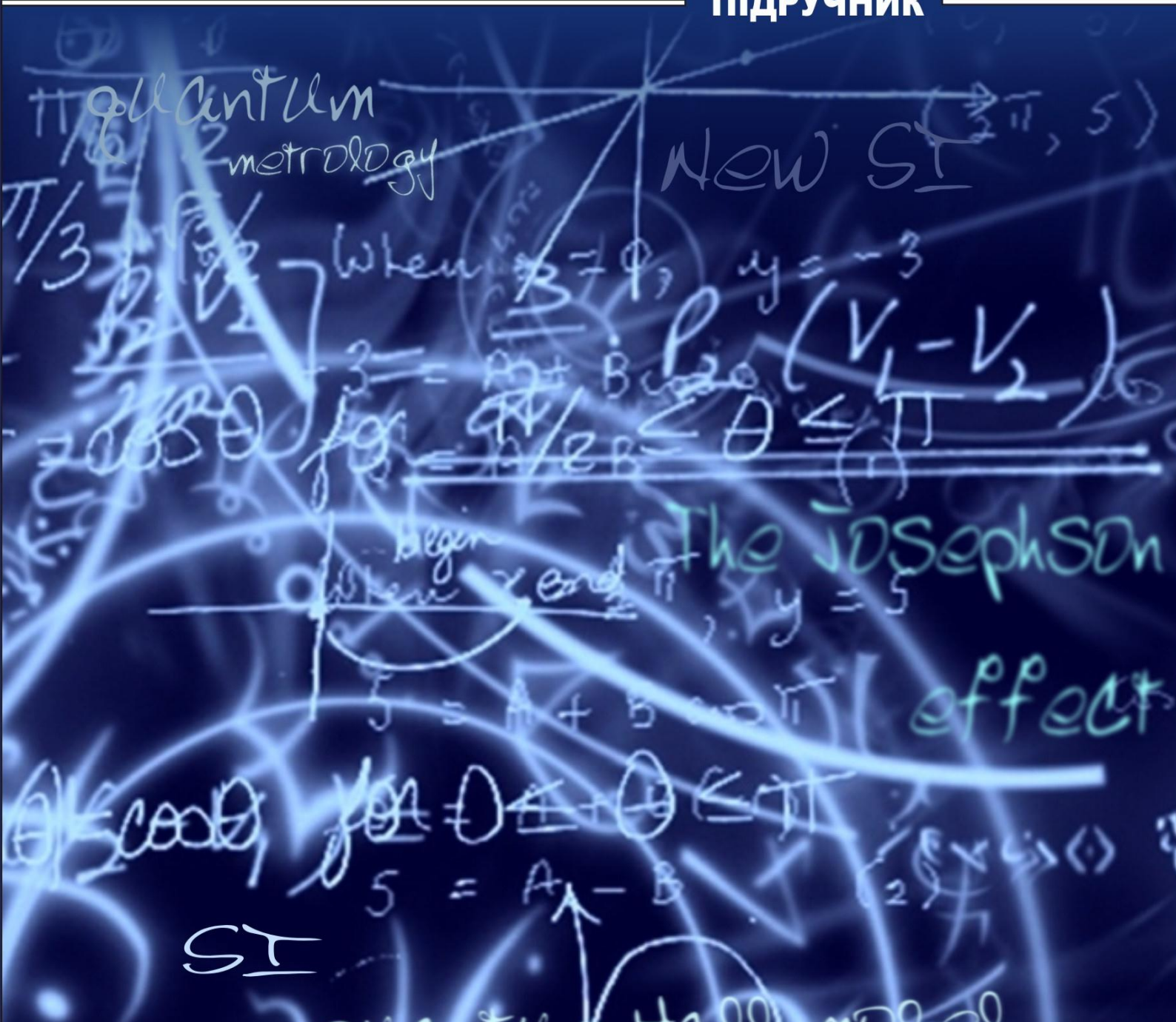
Ю.Ф. ПАВЛЕНКО, С.І. КОНДРАШОВ

П.І. НЕЄЖМАКОВ, Н.М. МАСЛОВА

Т.В. ДРОЗДОВА

ВСТУП ДО КВАНТОВОЇ МЕТРОЛОГІЇ

ПІДРУЧНИК



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ВСТУП ДО КВАНТОВОЇ МЕТРОЛОГІЇ

Підручник

За редакцією доктора технічних наук, професора Ю.Ф. Павленка

Рекомендовано вченою радою НТУ «ХПІ»

Харків 2017

УДК 389:530.145(075)
ББК 30.10я7
В 85

Рецензенти:

М.Д. Кошовий, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри
авіаційних приладів та вимірювань, Національний аерокосмічний
університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»;
В.Б. Кононов, д-р техн. наук, проф., начальник кафедри метрології та
стандартизації, ХУПС ім. Івана Кожедуба

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХПІ» як
підручник для студентів вищих навчальних закладів
лист № 6 від 07.07.2017 р.

Авторський колектив:

Ю.Ф. Павленко, С.І. Кондрашов, П.І. Неєжмаков,
Н.М. Маслова, Т.В. Дроздова

В 85 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.
ISBN 978-617-7577-06-4

У підручнику суттєво розширено розгляд питань використання квантових методів у реальній метрологічній і виробничій практиці, а також застосування їх у термометрії і фотометрії, яким присвячені окремі розділи. Введено пункти, які пояснюють деякі нові терміни і поняття сучасної метрології, а також ряд важливих додатків.

Призначено для студентів та викладачів вузів, а також фахівців у галузі метрології та вимірювальної техніки.

Іл.114. Табл. 15. Бібліогр.: 57 назв.

УДК 389:530.145(075)
ББК 30.10я7

ISBN 978-617-7577-06-4

© Ю.Ф. Павленко, С.І. Кондрашов,
П.І. Неєжмаков, Н.М. Маслова,
Т.В. Дроздова, 2017

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АПЧ – автоматичне підстроювання частоти
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ГКМВ (CGPM) – Генеральна конференція з мір та ваг
ДЕ – державний еталон
ДЕЧЧ – державний еталон часу і частоти
ДК – пульт дистанційного керування
ЕЛЧ – електронно-лічильний частотомір
ЕРС – електрорушійна сила
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
ЗВТ – засоби вимірювальної техніки
ІРК – іридіє-платиновий прототип кілограма
КСЧ – квантовий стандарт частоти
КОДАТА (CODATA) – Комітет із стандартних даних для науки і техніки
МБМВ (BIPM) – Міжнародне бюро з мір та ваг
МДН – метал – діелектрик – напівпровідник
МКМВ (CIPM) – Міжнародний комітет з мір та ваг
ВЧ – висока частота
НВЧ – надвисока частота
НІ – нуль-індикатор
НМІ – Національний метрологічний інститут
ННЕ – насичений нормальний елемент
НП – надпровідник
НСП – невилучена систематична похибка
НЧ – низька частота
РОЧМ – радіооптичний частотний міст
РМД – Рекомендація з метрології міждержавна
СКВ – середньоквадратичне відхилення
ТП – термоперетворювач
ТТМ – твердотільна міра
ФАПЧ – фазове автопідстроювання частоти
ФФС – фундаментальна фізична стала
ФС – фізична стала
ЯМР – ядерний магнітний резонанс

BNM – Національне бюро з метрології Франції

KOOMET (COOMET) – Євразійська організація національних метрологічних установ

EUROMET (EURAMET) – Європейська організація національних метрологічних установ

MEK (IEC) – Міжнародна електротехнічна комісія

ICO (ISO) – Міжнародна організація зі стандартизації

NIST (NIST) – Національний інститут стандартів та технологій (США)

NPL (NPL) – Національна фізична лабораторія (Англія)

OIML (OIML) – Міжнародна організація законодавчої метрології

PTB (PTB) – Фізико-технічний федеральний заклад з метрології (Німеччина)

SI (SI) – міжнародна система одиниць

SIS – матриця типу «надпровідник – ізолятор – надпровідник»

SINIS – матриця «надпровідник – ізолятор – нормальний метал – ізолятор – надпровідник»

SNS – матриця «надпровідник – нормальний метал – надпровідник»

ПЕРЕДМОВА

У 2013 р. був виданий перший в Україні навчальний посібник «Вступ до квантової метрології», призначений для вивчення нового напрямку в метрології – використання квантових явищ і фізичних сталих для відтворення одиниць і створення засобів вимірювань. Хоча ряд квантових ефектів давно і успішно використовується в наукових дослідженнях, а такі квантові пристрої, як лазери, мазери і деякі інші впроваджені в технічну практику, проте навчального посібника або наукового видання, в якому б були послідовно викладені питання використання квантових явищ у метрології і вимірювальній техніці, досі не існувало.

Протягом минулих 3 років за матеріалами цього посібника читався відповідний курс у НТУ «ХПІ», а також окремі теми в рамках інших дисциплін у кількох ВУЗах. Крім того, питання квантової метрології стали предметом ряду навчальних семінарів з підвищення кваліфікації, які проводяться для фахівців з метрології.

Як відзначалось у передмові до першого видання, сьогодні активно йде процес становлення цього нового напрямку в метрології, перевизначення одиниць вимірювання на основі фундаментальних фізичних сталих (ФФС) і трансформації міжнародної системи одиниць (SI). Резолюція 24-ї Генеральної конференції з мір та ваг (2011 р.) рекомендувала активно проводити роботу з вивчення і обговорення нових визначень і системи одиниць, що йде на зміну класичній системі SI. 25-а ГКМВ (2014 р.) підтвердила незмінність курсу на перевизначення одиниць і реформу SI та назвала орієнтовну дату її введення – 2018 рік.

В підручнику у порівнянні з посібником суттєво розширено розгляд питань використання квантових методів у реальній метрологічній і виробничій практиці, а також їх застосування у термометрії і фотометрії, яким присвячені окремі розділи. Введено пункти, які пояснюють деякі нові терміни і поняття сучасної метрології, а також ряд важливих додатків.

Підручник відповідає однойменній дисципліні, що викладається в НТУ «ХПІ», а також курсу «Актуальні проблеми метрології». Може бути корисним для всіх фахівців з метрології та вимірювальної техніки.

ВСТУП

У минулому ХХ сторіччі відбулась радикальна зміна уявлень щодо одиниць вимірювання та еталонів, які їх відтворюють. Система, що ґрунтується на механічних вимірюваннях і еталонах, подібних до платино-іридієвого еталона метра або еталона ампера у вигляді струмових ваг, фактично відійшла у минуле. Вона замінюється новою системою, що спирається на атомні і квантові явища, де за еталон приймаються досліджені стабільні фізичні явища і сталі (константи). Ця нова система вже одержала міжнародне визнання для таких одиниць, як секунда, що визначається через частоту надтонкого переходу в цезії, або метр, визначення якого пройшло еволюцію від довжини металевого стрижня через довжину хвилі випромінювання криптону до довжини світлової хвилі. На черзі інші одиниці, перш за все, ампер і кілограм.

Нова система має суттєві теоретичні переваги, але особливо важливими є її практичні позитивні риси: нові еталони є більш доступними та дозволяють вченим і метрологам-практикам проводити вимірювання з більшою точністю, меншими технічними та експлуатаційними труднощами.

Новий підхід у метрології відкриває надзвичайно широкі можливості, зокрема, спрощення системи передачі розміру одиниць від первинних еталонів до робочих засобів вимірювань, а в ряді випадків і до децентралізації цієї системи.

В наш час активно досліджуються шляхи, які дозволяють пов'язати одиниці вимірювань з фундаментальними фізичними сталими і частотою, як найбільш точно вимірюваною фізичною величиною. Це буде мати величезне практичне значення, оскільки, передаючи еталонні сигнали по телекомунікаційних системах, можна забезпечити прямий і безпосередній доступ до еталонів.

Дуже часто лунає критика на адресу метрологів від інженерів-практиків за те, що останні витрачають забагато часу і коштів у погоні за, як іноді здається, «нікому не потрібним» ще одним порядком точності. У той

же час існує велика кількість галузей науки, техніки, економіки та інших областей людської діяльності, де проведення вимірювань з найвищою можливою точністю обумовлюється практичними та економічними потребами. При цьому досягнута на сьогодні точність є недостатньою або практично недоступною. Це гальмує подальший розвиток технологій і підвищення якості продукції та послуг.

Ще одним важливим аспектом метрології і метрологічного забезпечення є можливість реалізації найвищої точності «в потрібний час і в потрібному місці». Очевидно, що цій вимозі можуть відповідати визначення одиниць вимірювань і їх еталони, що базуються на так званих «природних інваріантах», тобто явищах природи або фізичних ефектах, які можуть бути відтворені в необхідному місці і залежати лише від технічного обладнання метрологічного підрозділу. Очевидно також, що унікальні вироби людських рук, так звані «артефакти», до яких належав платино-іридієвий метр і досі належить кілограм, в жодній мірі не відповідають цій вимозі. Те ж саме можна сказати про еталон секунди, що ґрунтувався на обертанні Землі навколо Сонця, або про еталон ампера, що створений на взаємодії двох провідників зі струмом [1].

Однією з важливих вимог до еталонів є висока стабільність. Оскільки згадані вище еталони є важкодоступними, необхідно підтримувати незмінність відтворення ними одиниць протягом довгого часу, що можна забезпечити із задовільною точністю лише при створенні унікальних умов зберігання самих еталонів або різного роду систем зберігання одиниць.

Ситуація почала суттєво змінюватися завдяки введенню еталонів, що ґрунтуються на атомних та квантових явищах, які замінили механічні еталони.

Найбільш яскраво переваги нових еталонів виявилися на прикладі квантового еталона часу – частоти. На цей час секунда визначається через кількість періодів коливань сигналу, частота якого знаходиться у НВЧ діапазоні. Ця частота шляхом поділу або змішування може бути перенесена в широкий діапазон частот. Похибка вимірювання частоти може бути дуже малою – до 10^{-15} , а крім того, ця частота може передаватися по телекомунікаційних системах. Таким чином, вона стає доступною для кожного споживача. Жоден інший еталон поки не характеризується такою точністю і доступністю, і стратегічне завдання метрології полягає в тому, щоб створити для інших величин еталони, які б за точністю і доступністю наближались до еталона часу – частоти.

Наступним значним кроком стало нове визначення метра через довжину світлової хвилі. Ідея використання світлової хвилі для вимірювання довжини була подана ще Майкельсоном, який запропонував застосувати інтерферометр для створення еталона метра. Значним кроком у цьому напрямку стало встановлення метра через довжину хвилі випромінювання кріптонів ^{86}Kr . Нарешті, на сьогодні діє визначення одиниці довжини через частоту (час) і фундаментальну константу – швидкість світла, значення якої прийнято 299 792 458 м/с точно.

Відкриття квантових ефектів привели до справжньої революції в електричних вимірюваннях. Використання квантових ефектів Джозефсона, Холла і ядерного магнітного резонансу замість традиційних методів, що базуються на механічних вимірюваннях, дозволили підняти точність відтворення електричних одиниць приблизно на три порядки і значно спростити всю систему забезпечення єдності електричних вимірювань.

Успіхи у використанні квантових ефектів і у технологіях виготовлення відповідних пристроїв для їх надійної реалізації привели до створення паралельної з SI **практичної системи** електричних одиниць, а також визначили умови для створення природного еталона одиниці маси замість існуючого сьогодні артефакту у вигляді платино-іридієвого циліндра.

Усе це у сукупності поставило питання про перегляд визначень одиниць вимірювань, методики їх відтворення, принципів побудови еталонної бази і самої SI. Фактично народилась нова метрологія, яка одержала назву **квантової**. Розгляду змісту квантової метрології, її методології, еталонів, створених на основі квантових ефектів, а також перспектив розвитку присвячений даний підручник.

Розділ 1

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ КВАНТОВОЇ МЕТРОЛОГІЇ

1.1. Основні поняття і терміни

У підручнику використовуються переважно терміни і визначення відповідно до ДСТУ 2681-94, який зараз є чинним в Україні. Але цей стандарт діє вже більше 20 років, за даний час з'явилися нові термінологічні документи, зокрема, Міждержавні рекомендації РМГ 29-99 [4], що підписала Україна, і Міжнародний словник з метрології VIM-3, які вводять низку нових термінів і понять, а також відображають нові тенденції в метрології, що виходять за межі ДСТУ 2681-94.

До таких тенденцій відносять поступову заміну концепції «похибки вимірювань» на концепцію «невизначеності», введення поняття «метрологічної простежуваності», надання нового змісту процедурі калібрування, а також уточнення деяких термінів і понять.

Тому нижче наведено декілька нових термінів і понять для розуміння наведеного у розділі матеріалу у зіставленні з існуючими.

«Єдність вимірювань» і «метрологічна простежуваність»

Термін «єдність вимірювань» у ДСТУ 2681-94 має таке формулювання.

Єдність вимірювань – стан вимірювань, за якого їх результати виражаються в узаконених одиницях і похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю.

Уточнення РМГ-29-99:

Єдність вимірювань – стан вимірювань, за якого їх результати виражаються в узаконених одиницях, розміри яких в установлених межах дорівнюють розмірам одиниць, що відтворюються первинними еталонами, а похибки результатів вимірювань відомі та із заданою ймовірністю не виходять за встановлені межі .

Як бачимо, уточнення стосується співставлення з первинним еталоном, що не є суттєвим, але більш конкретним і корисним.

Міжнародний словник VIM-3 замість терміна «єдність вимірювань» вводить термін «метрологічна простежуваність».

Метрологічна простежуваність – властивість результату вимірювань, за допомогою якої результат можна співставити з основою для порівняння через документально підтверджений безперервний ланцюг калібрувань, що зумовлюють невизначеність вимірювань.

Цей термін одержав значне поширення в міжнародній метрології і став одним з визначальних для оцінювання стану метрологічного забезпечення.

Калібрування (за РМГ-29-99) – сукупність операцій, яка встановлює співвідношення між величиною, одержаною за допомогою даного ЗВТ, і відповідним значенням величини, визначеним за допомогою еталона з метою визначення дійсних метрологічних характеристик цього ЗВТ.

З цього визначення виходить, що при калібруванні відбувається передавання розміру одиниці величини, що відтворюється або зберігається еталоном, менш точному ЗВТ шляхом визначення співвідношення між значеннями величини, що зберігається еталоном, і відповідними показаннями ЗВТ, що калібрується.

Калібрування (за міжнародним словником VIM-3) – операція, в ході якої при заданих умовах на першому етапі встановлюють співвідношення між значеннями величин з невизначеностями вимірювань, які забезпечують еталони, і відповідними показаннями з притаманними їм невизначеностями, а на другому етапі на основі цієї інформації встановлюють співвідношення, що дозволяє отримувати результат вимірювання виходячи з показання.

Між цими двома визначеннями не існує принципової різниці, але визначення VIM-3 є більш повним: по-перше, воно вказує на необхідність урахування невизначеностей вимірювань, по-друге, на можливість внесення поправки в результат вимірювання.

Невизначеність вимірювання – параметр, який пов'язаний з результатом вимірювання та характеризує дисперсію (розсіяння) значень, що можуть бути приписані вимірюваній величині внаслідок одержаної інформації.

Стандартна невизначеність – невизначеність вимірювання, що виражена у вигляді стандартного (середньоквадратичного) відхилення.

Стандартна невизначеність за типом A (u_A) – невизначеність вимірювання, яка оцінюється статистичними методами.

Стандартна невизначеність за типом B (u_B) – невизначеність вимірювання, яка оцінюється іншими, не статистичними методами.

Сумарна стандартна невизначеність (u_C) – середньоквадратична сума стандартних невизначеностей за типом A і за типом B:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}.$$

Розширена невизначеність U_P – добуток сумарної стандартної невизначеності і коефіцієнта, більшого, ніж число один (коефіцієнт охоплення). Коефіцієнт охоплення k_o розраховується за окремою методикою, при $P=0,95$ він дорівнює 2:

$$U_P = k_o u_C.$$

Фізична суть розширеної невизначеності – інтервал навколо результату вимірювання, у границях якого знаходиться більша частина значень, що обґрунтовано можуть бути приписані вимірюваній величині для довірчої ймовірності P .

Принцип вимірювання – явище, яке становить основу вимірювання.

Метод вимірювання – загальний опис логічної послідовності операцій при вимірюванні.

Методика вимірювань – детальний опис згідно з принципом вимірювання і даним методом вимірювання, який базується на моделі вимірювань і включає обчислення, необхідні для одержання результату вимірювання.

Референтна методика вимірювань – методика, яка може бути використана для оцінки правильності вимірюваних значень величини, одержаних за іншими методиками вимірювань величин того ж роду.

Таким чином, референтна методика – це найбільш достовірна, первинна методика для існуючого рівня знань.

Первинний еталон – еталон, в основу якого покладена референтна методика вимірювань, або артефакт, обраний за погодженням.

Відтворення одиниці – відтворення одиниці шляхом формування фіксованої за розміром фізичної величини відповідно до визначення її одиниці.

Передавання розміру одиниці – зведення одиниці фізичної величини, яка відтворюється або зберігається ЗВТ, що повіряється (калібрується), до розміру одиниці, яка відтворюється або зберігається еталоном.

Звірення ЗВТ – порівняння ЗВТ з еталоном того ж виду (міри з мірою, ВП з ВП) для визначення систематичної похибки.

Артефакт – унікальний виріб рук людини.

Прототип – еталон, первинний зразок.

1.2. Елементи сучасної фізичної картини світу і квантова метрологія

Світ, в якому ми живемо, уявляє собою єдиний і багатовимірний простір, в якому всі предмети і явища знаходяться в різноманітних станах і формах. 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 співрозмірних 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.

Загальновідомо, що всім явищам і об'єктам матеріального світу притаманний корпускулярно-хвильовий дуалізм, який характеризується наявністю у об'єктів протилежних властивостей: *корпускулярних* (дискретних) і *хвильових* (безперервних). Математичним апаратом цього дуалізму є квантова механіка. Перше формулювання цієї властивості було подано в рівняннях де Бройля, розвинене в роботах Ейнштейна і Планка.

У мікросвіті найбільш явно проявляються корпускулярні властивості матерії, які пояснюються статистичними законами квантової механіки. В макросвіті діють у основному закон класичної механіки Ньютона, а також закони термодинаміки, електромагнетизму тощо.

Квантова метрологія, в широкому сенсі цього терміна, 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.

Використання квантових явищ нерозривно пов'язане з використанням *фундаментальних фізичних сталих* (ФФС).

ФФС – незалежні фізичні сталі, що є, як правило, характерними коефіцієнтами фундаментальних фізичних теорій. РМГ 29-99 дає таке визначення: *фізична стала* – фізична величина, що має незмінне значення при ви-

значених обставинах в обраній системі одиниць. *Фундаментальна фізична стала* (ФФС) – така фізична величина, значення якої, визначене експериментально в обраній системі одиниць, містить інформацію про найбільш загальні (фундаментальні) властивості матерії, вона залишається незмінною за будь-яких умов. До числа ФФС належать швидкість світла у вакуумі c_0 , електрична (ϵ_0) і магнітна (μ_0) сталі, стала Планка h , елементарний заряд (заряд електрона) e тощо. Розрізняють універсальні, електромагнітні, атомні та фізико-хімічні сталі.

Прагнення виразити одиниці вимірювань через ФФС, як істинні природні інваріанти, сформувалося не зараз. Ще в XIX столітті Дж. К. Максвелл у 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».

Можна вважати, що ідея використання квантових явищ і ФФС у метрології належить німецькому фізику М. Планку.

На початку XX ст. М. Планк довів, що основні одиниці можуть бути визначені через фундаментальні фізичні сталі: швидкість світла c_0 , сталу Планка h і гравітаційну сталу 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 об-

числити одиниці довжини $l = \sqrt{\frac{Gh}{c_0^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-35}$ м, часу $t = \sqrt{\frac{Gh}{c_0^5}} \approx 5,4 \cdot 10^{-44}$ с і

маси $m = \sqrt{\frac{\hbar c_0}{G}} \approx 2,2 \cdot 10^{-8}$ кг [2].

Однак «планківські одиниці» знаходяться дуже далеко від використовуваних на практиці діапазонів. Крім того, планківські одиниці не відтворюються за допомогою реальних фізичних об'єктів. Саме тому планківські одиниці не використовуються в метрології.

Відомі також спроби створення природних систем одиниць Дж. Стоуні [3], Хартрі та інші, які знайшли обмежене використання в окремих галузях науки.

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

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

1.3. Фізичні ефекти, що використовуються у квантовій метрології

1.3.1. Квантування і квантова механіка

У витоків квантової механіки стояли такі вчені як Л. де Бройль, А. Ейнштейн, М. Планк. Основною у квантовій механіці є ідея про те, що корпускулярно-хвильова подвійність властивостей, встановлена для світла, має універсальний характер. Вона повинна виявлятися для будь-яких частинок, що володіють імпульсом сили.

Засновником квантової теорії слід вважати саме М. Планка, який у 1900 р. запропонував новий підхід, що не відповідає класичним уявленням: розглядати електромагнітну енергію як дискретну, тобто таку, що може передаватися тільки окремими, хоч і дуже малими порціями (квантами). Як таку порцію Планк запропонував величину

$$E=h\nu, \quad (1.1)$$

де E – порція (квант) енергії електромагнітного випромінювання;

ν – частота випромінювання;

h – коефіцієнт пропорційності, який одержав згодом назву сталої Планка.

Стала Планка h перекидає міст між мікро- і макросвітом через співвідношення (1.1), що пов'язує енергію E та частоту випромінювання ν . Так, в еталоні частоти енергія є мікроскопічною характеристикою атомних переходів, а частота випромінювання – макроскопічною величиною, доступною для спостережень.

Якщо у квантовій метрології ми оперуємо терміном «атомних переходів», необхідно торкнутись питання про будову атома. Хоча це питання є предметом цілої науки, в елементарному уявленні атом складається з ядра і електронів. Зараз існують складні сучасні теорії побудови атома, але всі вони не суперечать прозорій моделі атома англійського фізика Е. Резерфорда, розвинутої в подальшому датським фізиком Н. Бором. Ця модель одержала назву моделі атома Резерфорда – Бора і була викладена в таких постулатах (постулати Бора):

- в атомі існує набір стаціонарних станів, знаходячись в яких, атом не випромінює електромагнітних хвиль. Стаціонарним станам відповідають стаціонарні орбіти, по яких рухаються електрони, але випромінювання енергії при цьому відсутнє;

- у стаціонарному стані атома електрон, що рухається по круговій орбіті, має квантові значення моменту імпульсу, що задовольняє умові

$$L_k = k \hbar, \quad k = 1, 2, 3 \dots;$$

- при переході атома з одного стаціонарного стану в інший випромінюється або поглинається один фотон (квант).

Енергія фотона дорівнює різниці енергій у двох станах атома:

$$E = W_n - W_m = h\nu. \quad (1.2)$$

Цей вираз носить назву квантово-механічної формули. Не важко бачити її тотожність з формулою Планка.

Постулати Бора пояснюють той факт, що електрони, які знаходяться у стаціонарних атомах, без зовнішньої дії не випромінюють електромагнітної енергії. Було також встановлено, що перехід електронів на більш далеку від ядра орбіту веде до збільшення енергії атома (поглинання), а перехід на орбіту, більш близьку до ядра, викликає зменшення енергії атома (випромінювання).

1.3.2. Тунелювання електронів

Іншим явищем, яке використовується у квантовій метрології, є тунелювання електронів через потенційний бар'єр (наприклад, тонку плівку діелектрика в умовах надпровідності).

Унікальною особливістю квантових частинок, у тому числі електронів, є їх особливість проникати через перешкоду (енергетичний бар'єр) навіть у тих випадках, коли їхня енергія нижча від потенційного бар'єра, властивого для даної перешкоди. Це явище носить назву тунелювання. Схематично воно показане на рис. 1.1. Якби електрон був класичною частинкою з енергією E , то він, зустрівши на своєму шляху перешкоду, для подолання якої необхідна енергія $U > E$, повинен би був відбитись від цієї перешкоди. Однак, як хвиля, що володіє відповідною хвильовою функцією, він проходить через цю перешкоду, хоча і з витратою енергії. Ймовірність подолання перешкоди тим вища, чим геометрично тонший бар'єр і чим менша різниця між енергією електрона і енергетичною висотою бар'єра.

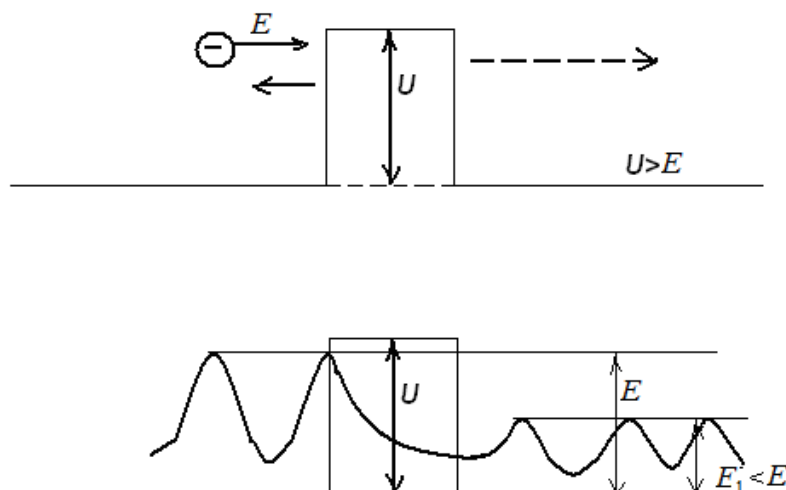


Рисунок 1.1 – Тунелювання електрона через бар'єр

Таким чином, явище тунелювання окремих електронів було відкрите і підтверджене експериментально. Дослідження цього явища привело до відкриття *ефекту Джозефсона* і до створення на його основі еталонів постійної напруги [5].

1.3.3. Надпровідність і ефект Мейснера

Явище надпровідності полягає у стрибкоподібному падінні електричного опору до нуля при зниженні температури нижче деякої критичної. Явище надпровідності було відкрите у 1911 р. голландським фізиком Х. Камерлінг–Онсом під час вимірювання електричного опору ртуті при дуже низьких температурах. Онес хотів з'ясувати, наскільки малим може стати опір речовини електричному струму, якщо максимально очистити її від домішок і вилучити тепловий шум, тобто знизити температуру. Результат виявився несподіваним: при температурі нижче 4,15 К опір майже миттєво зник.

Дослідження цього явища і його тлумачення йшли досить повільно, оскільки для його спостереження потрібно було вирішити цілий ряд фізичних і технічних проблем.

Температуру $T_{кр}$, при досягненні якої виникає стрибок опору, було названо критичною; вона своя для кожної речовини. Крім того, не кожна речовина може стати надпровідником (НП). Наприклад, мідь – один з найкращих провідників, але надпровідником не стає. А ось алюміній, свинець, ртуть і ряд інших металів переходять у надпровідний стан, а проведені з

ними експерименти показують, що питомий опір надпровідника не перевищує 10^{-23} Ом/см – у багато разів менший, ніж у міді. Критичні температури для деяких надпровідників складають: для алюмінію – 1,14 К; олова – 3,69 К; ртуті – 4,15 К; ванадію – 4,3 К; танталу – 4,38 К; свинцю – 7,26 К; ніобію – 9,2 К.

Ще Онес виявив, що надпровідністю володіють і деякі сплави, наприклад, ртуті з золотом і оловом.

У 1933 р. було відкрито другу фундаментальну властивість надпровідників (німецькі фізики Мейснер і Оксенфельд) – виштовхування з нього зовнішнього магнітного поля. У товщі надпровідника магнітне поле ослаблюється до нуля – «виштовхується», тобто НП є ідеальним діамagnetиком. Ця властивість НП одержала назву *ефекту Мейснера*.

1.3.4. Об'єднання електронів у «куперівські пари»

Ще одним ефектом, який має місце при $T < T_{кр}$, є об'єднання електронів у так звані «куперівські пари» (за ім'ям фізика, що відкрив це явище), пов'язаних єдиною хвильовою функцією.

Більш того, всі пари є узгодженими, когерентними між собою і характеризуються згаданою вище єдиною хвильовою функцією.

Чому куперівські пари рухаються в металі (кристалі) без опору? Тому що їх рух є узгодженим, когерентним, їх хвильова функція простягається на простір, значно більший від розміру (кроку) кристалічної решітки, і розповсюджується на всю довжину надпровідника. Тому куперівські пари не «помічають» іонів у решітці і не розсіюються на них, як великі морські хвилі не помічають маленьких трісок, що плавають на поверхні. Так виникає струм надпровідності.

1.4. 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 стали підґрунтям, на якому були відкриті макроскопічні квантові ефекти, що стали основою методології квантової метрології. Так, мікроскопічний ефект квантового переходу в цезії-133 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.

Також на явищі тунелювання електронів ґрунтується макроскопічний ефект «одноелектронного тунелювання», який є перспективним для відтворення одиниці сили струму.

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

При збігу частоти зовнішнього опромінювання з частотою прецесії ядра атома деякої речовини, поміщеної в магнітне поле, має місце макроскопічний *ефект ядерного магнітного резонансу*, який супроводжується атомним переходом і випромінюванням (поглинанням) енергії [7,8].

До квантових методів можна віднести також фотоелектричний ефект, деякі фізико-хімічні методи (у тому числі *рентгенографічний*, або «XRCD-метод»), які використовуються у квантовій метрології [9].

Названі вище макроскопічні квантові ефекти (*ЯМР, Джозефсона, Холла, одноелектронного тунелювання*) стали основними методами квантової метрології і докладно розглядаються далі.

1.5. Фундаментальні фізичні сталі

Очевидно, що розвиток науки і технологій потребує максимально можливої точності і достовірності вимірювання значень ФФС. Тому йде постійна робота у цьому напрямку.

Визначенням, погодженням і розповсюдженням ФФС займається Міжнародний комітет чисельних даних для науки і технологій (КОДАТА, CODATA).

КОДАТА проводить роботи з погодження сталих з 1964 р. Відповідні уточнення вносились у 1965, 1969, 1973, 1986 і 2002 рр. Рекомендації КОДАТА 2002 р. діють і на цей час.

У Додатку 1 наведено значення деяких ФФС, погоджених КОДАТА у 2002 р.

Розглянемо фізичний зміст деяких ФФС, які найчастіше вживаються у квантовій метрології.

Швидкість світла

Швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у вільному просторі (швидкість світла у вакуумі) c_0 – одна з найважливіших фізичних сталих. Вона є *граничною* швидкістю розповсюдження будь-яких фізичних рухів і не змінюється при переході від однієї системи до іншої, тобто вона *інваріантна*. На сьогодні це стала, яка виміряна з найбільшою, порівняно з іншими сталими, точністю (невизначеність близько $1 \cdot 10^{-9}$). Її значення рішенням XVII ГКМВ у 1983 р. (про нове визначення метра) зафіксоване і складає 299792458 м/с точно. При такому визначенні швидкість світла стає фактично *абсолютною метрологічною сталою*. На основі цієї ФС стало можливим створення єдиного еталона часу – частоти – довжини, а також об'єднання частотно-часових і лінійно-кутових вимірювань в єдиний напрямок – вимірювання простору і часу.

Стала Планка

Стала Планка, або *квант дії*, була введена М. Планком відповідно до його квантової теорії. Для розуміння цієї сталої розглянемо поняття кванта енергії.

Квант енергії є мінімальною порцією енергії; число квантів може бути лише цілим ($1, 2, \dots, n$, а не $\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}$ тощо).

Значення (*розмір*) кванта залежить від типу енергії, а точніше, від частоти. Наприклад, розмір кванта червоного світла складає тільки половину кванта фіолетового світла. Чим менша довжина хвилі (вища частота), тим більший квант цієї хвилі, і залежність є прямопропорційною (1.1).

Розмірність кванта така сама, як і розмірність енергії – джоуль. Розмірність сталої Планка – джоуль в секунду, її значення $h = 6,6260693(11) \cdot 10^{-34}$ Дж·с. У ряді виразів використовується також стала $h/2\pi = \hbar$, яка одержала назву сталої Дірака.

Елементарний заряд (заряд електрона)

Як квант енергії є мінімально можливою в природі порцією енергії, так і елементарний заряд є мінімально можливим електричним зарядом. Такий заряд має електрон. Поняття елементарних зарядів увів М. Фарадей, назвавши їх «атомами електрики», а термін «електрон» запропонував у 1874 р. Г. Дж. Стоуні. Перші точні вимірювання елементарного заряду були проведені у 1910–1914 рр. американським фізиком Р. Мілікеном і російським фізиком А. Іоффе. Згідно з останніми рішеннями КОДАТА (2002 р.) значення елементарного заряду становить $1,60217653(14) \cdot 10^{-19}$ Кл, а його відносна стандартна невизначеність складає $8,5 \cdot 10^{-9}$.

Стала Больцмана

Дана стала за своєю суттю відрізняється від інших сталих, що використовуються у квантовій метрології: c_0 , h і e . Останні мають універсальний фундаментальний характер, у той час як стала Больцмана k є коефіцієнтом пропорційності між справжньою (істинною) характеристикою теплового стану системи – тепловою енергією Θ і історично усталеною одиницею вимірювання термодинамічної температури T – кельвіна. Першим цей зв'язок установив Гіббс [10]:

$$\Theta = kT, \quad (1.3)$$

а числове значення k знайшов Планк. На цей час значення сталої Больцмана прийнято рівним $k = 1,3806488(13) \cdot 10^{-23}$ Дж/К з відносною невизначеністю менше $1 \cdot 10^{-6}$. Саме величина k і характеризує одиницю термодинамічної температури в енергетичному еквіваленті [9].

Стала Больцмана входить до цілого ряду найважливіших рівнянь фізики, зокрема, у рівняння стану ідеального газу, у вираз для середньої енергії теплового руху частинок. Значення k визначають через співвідношення $k=R/N_A$, де R – універсальна газова стала, N_A – стала Авогадро.

Стала Авогадро

В атомістичній концепції будови матерії замість маси виникло ще одне уявлення про «кількість речовини», пов'язане з кількістю частинок структурних елементів, а за базисну одиницю кількості речовини був прийнятий *моль*.

Під кількістю речовини 1 моль розуміється така кількість якоїсь речовини, в якій міститься стільки структурних елементів, скільки атомів міститься у вуглеці ^{12}C масою 12,00 г. Це число частинок одержало назву числа Авогадро, або сталої Авогадро N_A . Вона може бути знайдена, якщо відома маса 1 атома вуглецю ^{12}C :

$$N_A = \frac{12,00 \text{ г/моль}}{\text{маса 1 атома } ^{12}\text{C}} [\text{моль}^{-1}]; \quad (1.4)$$
$$N_A = 6,022\,1415 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Стала Авогадро має розмірність моль^{-1} . При цьому масу речовини 1 моль можна виразити як

$$M = N_A \cdot \text{маса 1 атома} = N_A \cdot m_a, \quad (1.5)$$

де $[M] = 1 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1} = 1 \text{ кг/кмоль}$.

Величина M має назву *молярної маси*, тобто це маса одного моля даної речовини.

Якщо відоме число структурних елементів речовини N , можна знайти відповідне значення кількості речовини в молях:

$$X_{\text{моль}} = \frac{N}{N_A} = \frac{m_a N}{m_a N_A} = \frac{m[\text{кг}]}{M[\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}]} = X[\text{моль}]. \quad (1.6)$$

Значення N_A вдалося визначити шляхом макроскопічних вимірювань на монокристалі кремнію. Якщо m – маса кристала, V – об'єм, то густина $\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_a N}{V}$.

Величина $\left(\frac{N}{V}\right)^{-1}$, або $\left(\frac{V}{N}\right)$ – об'єм, який займає один атом відповідно до теорії побудови кристала. Вдалося виміряти сталу решітки, молекулярну масу (мас-спектрометром), густину, і нарешті, сталу Авогадро (похибка $\sim 5 \cdot 10^{-8}$). Цей метод з використанням рентгенівських променів одержав назву «XRCD-метод» [9].

Магнітна і електрична сталі

Магнітна стала μ_0 (в різних джерелах використовують також терміни «магнітна проникність вакууму», «проникність вільного простору») була уведена при встановленні системи одиниць МКСА, а згодом перейшла в SI. Ця стала була необхідна для узгодження електричних і механічних величин, а її значення виходить із існуючого визначення ампера через механічну силу і складає $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,566370614 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ точно, або Тл М/А.

Таким чином, ця стала має чисто розмірне значення і фізичного сенсу не містить. Для вакууму вона є коефіцієнтом пропорційності між напруженістю магнітного поля H і магнітною індукцією B : $B = \mu_0 H$.

Електрична стала ϵ_0 (іноді «діелектрична проникність вакууму») також використовується для узгодження електричних і механічних величин і фізичного сенсу не несе. Ця стала є коефіцієнтом пропорційності між напруженістю електричного поля E і електричною індукцією D : $D = \epsilon_0 E$, її розмірність [Ф/м]. Входить у рівняння електромагнітного поля.

Стала ϵ_0 пов'язана з μ_0 і швидкістю світла c фундаментальним співвідношенням $c_0 = \sqrt{1/(\mu_0 \epsilon_0)}$, звідки $\epsilon_0 = (\mu_0 c_0^2)^{-1} = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Слід зауважити, що ці сталі, які зафіксовані в SI, при переході в Нову SI на визначення електричних одиниць через сталі e і h , втрачають свій статус і

повинні визначатись експериментально, але ця різниця не перевищує кількох одиниць восьмого знака (10^{-8}). Докладніше про це буде сказано нижче.

Гіромагнітне відношення протона

Ще одна стала, яка використовується в метрології, є *гіромагнітне відношення ядра певної речовини*. Фізична суть цієї сталої така (рис. 1.2).

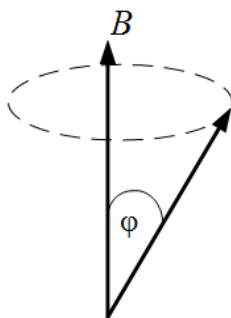


Рисунок 1.2 – Прецесування магнітного моменту

Ядра атомів речовин – діамagnetиків володіють магнітним моментом μ і моментом кількості руху p . Відношення цих моментів $\gamma = \mu/p$ має назву гіромагнітного відношення і є фізичною сталою для даного ядра, значення якої не залежить від зовнішніх умов.

Якщо таку діамagnetічну речовину в ампулі помістити в однорідне постійне магнітне поле з індукцією B , то магнітні моменти (диполі) будуть прецесувати навкруги напрямку вектора індукції B – аналогічно прецесії гіроскопа в гравітаційному полі Землі. Однією з речовин, яка володіє вираженими властивостями діамagnetизму, є водень, ядром атома якого є протон.

Як буде показано далі, в магнітних вимірюваннях, зокрема, для відтворення *одиниці магнітної індукції* (B), широко використовується ефект *ядерного магнітного резонансу* (який має місце при збігу частоти прецесії $f_{\text{пр}}$ електронів з частотою зовнішнього магнітного поля), а із речовин – водень, ядром якого є протон. Магнітну індукцію знаходять із співвідношення $B = 2\pi f / \gamma_p$, де γ_p – гіромагнітне відношення протона, $f_{\text{пр}} = f = f_{\text{ямр}}$ – частота ЯМР.

Таким чином, описана стала є дуже важливою для відтворення базової одиниці в галузі магнітних вимірювань – *тесли*.

Окремо розглянемо «умовно сталі», які зафіксовані в СІ і використовуються для відтворення основних одиниць цієї системи.

Частота надтонкого переходу в цезії

Частота переходу, пов'язаного з надтонким розщепленням основного стану атома цезію-133, $\nu(^{133}\text{Cs})$, строго кажучи, не є ФФС, але вона прийнята

як стала для визначення одиниці часу. Критерієм для обрання атомної частоти для відтворення одиниці часу є ширина резонансної лінії випромінювання (залежності струму детектора від частоти електромагнітного поля), яка визначається часом прольоту атомів або молекул через область, де вони взаємодіють.

Визнано, що на сьогодні оптимальним за цим критерієм є надтонкий перехід у цезії, і частота цього переходу прийнята за фізичну сталу, що дорівнює 9192 631 770 Гц точно, і зафіксована у визначенні секунди (XIII ГКМВ, 1967 р.).

Спектральна сила світлового потоку монохроматичного випромінювання $K(\lambda_{555})$.

Ця стала належить до області оптичних вимірювань, зокрема, до одиниці сили світла – кандели. Для розуміння суті цієї сталої уточнимо поняття радіометрії і фотометрії.

Радіометрія описує оптичне випромінювання в чисто енергетичних величинах (енергія, потужність, сила випромінювання тощо), а фотометрія – у величинах, пов'язаних із зоровою системою людини і її спектральною чутливістю (світловий потік, сила світла, освітленість тощо).

Характеристика спектральної чутливості людського ока, тобто залежність спектральної чутливості ока від довжини хвилі світлового випромінювання $v(\lambda)$ наведена на рис. 1.3.

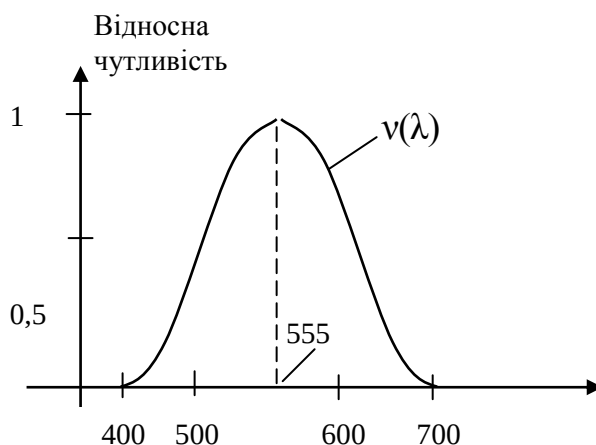


Рисунок 1.3 – Характеристика спектральної чутливості ока людини

Як відомо, з 1979 р. діє таке визначення основної одиниці світлових вимірювань – кандели: **кандела** – сила світла в заданому напрямку від джерела монохроматичного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку складає $1/683$ Вт/ср.

У цьому визначенні введено дві величини: $540 \cdot 10^{12}$ Гц – частота найкращої чутливості людського ока «стандартного спостерігача» (або довжина хвилі $\lambda = 555$ нм); 683 лм/Вт – *спектральна сила світлового потоку монохроматичного випромінювання на цій частоті* ($K(\lambda_{555})$). Ця величина є світловою сталою, що означає максимальне значення фотометричного еквівалента випромінювання для денного бачення або максимальну світлову ефективність.

Нагадаємо, що люмен (одиниця світлового потоку) на ватт (одиниця потоку випромінювання, потужності випромінювання) дорівнює світловій ефективності, при якій потужності випромінювання 1 Вт відповідає світловий потік 1 лм.

Величина $K(\lambda)$ по суті є коефіцієнтом переходу між енергетичними і фотометричними одиницями, тобто розмірність $K(\lambda)$ є одиниця світлового потоку (люмен) на ватт. Значення $K(\lambda)$ визначається температурою плавлення платини, яку було прийнято за еталон, і сталими формули випромінювання Планка, а також показником заломлення повітря. Прийнято $K(\lambda_{555}) = 683$ лм/Вт точно.

Більш докладно про зв'язок кандели зі сталою $K(\lambda_{555})$ і про шляхи її реалізації буде йтися в розділі 10.

Сталі Джозефсона і Клітцинга

Відкриття квантових ефектів і розробка на їх основі еталонів ряду електричних одиниць створили передумову для переходу до принципово нової системи еталонів у галузі електрорадіовимірювань. Фактично цей процес почався з 1990 р., коли вступила в дію рекомендація МККВ про використання квантових ефектів Джозефсона і Холла для відтворення розмірів вольт і ома. Були зафіксовані значення сталої Джозефсона $K_{J-90} = 2e/h \equiv 483597,9$ ГГц/В і сталої Клітцинга $R_{K-90} = \frac{h}{e^2} \equiv 25812,807$ Ом. Так народились практичні одиниці, а система SI з рекомендаціями 1990 р. одержала назву практичної. Як бачимо, ці сталі є комбінацією ФФС e і h , які зафіксовані. Але на той час (1990 р.) сталі Джозефсона і Клітцинга були визначені незалежно з використанням відповідних ефектів. З уведенням Нової SI у межах роботи з узгодження ФФК планується уточнення цих сталих, яке за попередніми даними не перевищить кілька одиниць на 10^{-9} .

Більш докладно це питання буде висвітлене далі.

1.6. Система SI і квантова метрологія

В Україні відповідно до Закону «Про метрологію та метрологічну діяльність» діє Міжнародна система одиниць (SI), яка прийнята у 1960 р. XI Генеральною конференцією з мір та ваг (ГКМВ). Відповідні державні стандарти ДСТУ 3651.0-2:97 [11] повністю відповідають стандартам ISO 31 «Величини та одиниці» – (1992) та ISO 1000 «Одиниці SI та рекомендації з використання їх частинних, кратних та інших одиниць».

Основні одиниці системи SI зі скороченими позначеннями українськими та латинськими буквами наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні одиниці Міжнародної системи одиниць (SI)

Фізична величина		Одиниці фізичних величин		
Найменування	Розмірність	Найменування	Позначення	
			міжнародне	українське
Довжина	L	метр	m	м
Маса	M	кілограм	kg	кг
Час	T	секунда	s	с
Сила струму	I	ампер	A	А
Сила світла	J	кандела	cd	кд
Термодинамічна температура	Θ	кельвін	K	К
Кількість речовини	N	моль	mol	моль

Визначення основних одиниць відповідно до рішення ГКМВ:

Метр – довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за $1/299792458$ частину секунди.

З цього визначення виходить, що швидкість світла у вакуумі, c_0 , дорівнює $299\,792\,458$ м/с точно.

Кілограм – одиниця маси, що дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма.

З цього виходить, що маса міжнародного прототипу кілограма, $m(K)$, завжди дорівнює 1 кг точно.

Секунда – час, що дорівнює $9\,192\,631\,770$ періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

З цього виходить, що надтонке розщеплення атома цезію-133 в основному стані, ν_{CS} , дорівнює 9 192 631 770 Гц точно.

Ампер – сила незмінного електричного 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 у $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

З цього виходить, що магнітна стала, μ_0 дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ точно.

Кельвін – одиниця термодинамічної температури і дорівнює 1/273,16 частині термодинамічної температури потрійної точки води.

З цього виходить, що термодинамічна температура потрійної точки води, $T_{птв}$, дорівнює 273,16 К точно.

Кандела – сила світла в заданому напрямі від джерела, що випромінює монохромне випромінення частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямі становить 1/683 Вт/ср.

З цього виходить, що спектральна сила світла, $K(\lambda_{555})$, для монохромного випромінення частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц дорівнює 683 лм/Вт точно.

Моль – кількість речовини, яка містить таку кількість структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою в 0,012 кг.

При використанні моля повинні бути визначені структурні елементи, якими можуть бути окремі атоми, молекули, іони, електрони, інші частинки або певні групи таких частинок.

З цього виходить, що молярна маса вуглецю-12, $M(^{12}C)$, дорівнює 12 г/моль точно.

Крім основних одиниць SI є велика група **похідних одиниць** (Додаток 2), які визначаються за законами взаємозв'язків між фізичними величинами або ж на основі визначення фізичних величин. Відповідні похідні одиниці SI виводяться із рівнянь зв'язку між величинами.

Відтворення основної одиниці здійснюється шляхом створення фіксованої за розміром ФВ відповідно до визначення одиниці. Відтворення похідної одиниці ФВ здійснюється на підставі вимірювання інших величин, функціонально зв'язаних із даною величиною.

Залежно від наукового напрямку утворено похідні одиниці для простору, часу, механічних, теплових, електричних, магнітних, акустичних, світлових величин та величин іонізуючого випромінювання.

Кратні та частинні одиниці. Найпрогресивнішим способом утворення кратних та частинних одиниць є прийнята у метричній системі мір десяткова кратність між великими і малими одиницями. Десяткові кратні та частинні одиниці від одиниць SI утворюються шляхом використання множників та префіксів від 10^{+24} до 10^{-24} (Додаток 3).

Використання квантових ефектів і ФФС для відтворення одиниць вимірювань, а також визнання МКМВ цього підходу привело фактично до паралельного існування в деяких видах вимірювань двох систем одиниць – класичної SI і «практичної». В частотно-часових і лінійно-кутових вимірюваннях уже введені нові визначення секунди і метра через квантові явища і ФФС [11], які наведені вище.

До цих одиниць можна додати також канделу, визначену через світлову сталу $K(\lambda_{555})$, яка хоч і не є ФФС, але може вважатись природним інваріантом.

Інша ситуація існує в електричних вимірюваннях: тут офіційно діють визначення одиниць, зокрема ампера, через механічні величини (це класична SI), в той час як з 1990 р. МКМВ рекомендував використовувати на практиці квантові ефекти для відтворення вольт і ома (це практична SI). Цей дуалізм, безумовно, необхідно ліквідувати, але зробити це не так просто. Перехід на нові визначення одиниць, по-перше, не повинен призвести до порушення взаємоузгодженості системи одиниць та її універсальності, по-друге, перехід на визначення через ФФС вимагає фіксації значень цих сталих, що можна зробити лише при високій точності їх визначення (з похибкою на рівні 10^{-8}). Підкреслимо, що недостатньо забезпечити необхідну точність тільки тих сталих, які використовуються у відомих квантових методах, а для інших задовольнитись меншою точністю. Справа в тому, що ФФС не є незалежними, всі вони пов'язані між собою законами природи. Тому для переходу від системи, що ґрунтується на механічних вимірюваннях, до системи, що спирається на квантові явища і частоту, надзвичайно важливо, щоб існувало загальне узгодження всіх коефіцієнтів, які пов'язують ці системи. Тільки тоді можна бути впевненими у відсутності неврахованих систематичних похибок. Таким чином, для переходу до нових визначень одиниць (нової системи одиниць) необхідно визначити з найбільш можливою точністю якомога більше фундаментальних сталих. Це є одним із завдань квантової метрології. Додамо, що питання про перевизначення одиниць – створення «нової SI» – є одним з найважливіших у міжна-

родному масштабі і стоїть на порядку денному ГКМВ, про що буде йтися далі.

Висновки

- 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.

- Основним напрямком розвитку нової метрології є прив'язка одиниць вимірювання до природних інваріантів – фундаментальних фізичних сталіх, використання квантових ефектів і стабільних фізичних явищ для відтворення одиниць. Цей напрямок одержав назву квантової метрології.

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

- Основними фізичними ефектами, що використовуються в квантовій метрології, є ефекти атомних переходів, тунелювання електронів, квантування руху і енергії, ядерний магнітний резонанс, надпровідність, на основі яких розроблені практичні методи відтворення ряду одиниць.

- Досвід використання квантових методів показав їх безумовні переваги над існуючими на цей час (механічними, астрономічними тощо). Ці переваги переконливо виявились при відтворенні одиниць часу і довжини, де вже відбулось перевизначення секунди і метра через фізичні сталі.

- Процес упровадження квантових методів у метрологічну практику активно продовжується і веде до необхідності перевизначення одиниць і реформи SI. Але реформа SI не повинна привести до втрати ряду її позитивних якостей і до руйнування системи. Тому вона розвивається поступово і зважено під контролем міжнародних метрологічних організацій МКМВ і ГКМВ.

Контрольні питання

1. Що означає термін *квантова метрологія*?
2. Що таке фізичні сталі? Які фізичні сталі відносять до *фундаментальних*? Які фізичні сталі ви знаєте?
3. Що означають у метрології терміни *прототип*, *артефакт*, *інваріант*?
4. Які фактори стимулювали розвиток квантової метрології?

5. Яка фізична суть *сталой Планка*?
6. Чи може бути електричний заряд менший від заряду *електрона*?
7. Визначте фізичну суть *сталой Больцмана*.
8. Назвіть фізичні ефекти, які використовуються у квантовій метрології.
9. Поясніть суть *квантово-механічної* формули.
10. Назвіть основні *постулати Бора*.
11. Які основні одиниці системи SI вже визначаються через ФФС? Поясніть ці визначення.
12. Що таке *квант енергії*? Чи може бути порція енергії менша від кванта?
13. Чи існують у природі процеси, швидкість яких перевищує *швидкість світла*?
14. Які фізичні величини пов'язує *квантово-механічна* формула?

Розділ 2

СЕКUNDA: ВІД АСТРОНОМІЧНОЇ ДО КВАНТОВОЇ СЕКУНДИ

2.1. Коротка історія

Час є однією з основних величин системи SI, найважливішим параметром для опису явищ, пов'язаних з рухом. Одиницею часу в SI є секунда. Обернена щодо секунди одиниця частоти – герц – є основним показником, що описує коливальні періодичні процеси. Історично людина пов'язує шкалу і інтервали часу з періодичними процесами, які вона спостерігає: рух небесних тіл, зміну дня і ночі, зими і літа, коливання маятника тощо.

Пошуки найкращого еталона часу, що відповідає вимогам необхідної точності, відтворюваності і доступності, мають велику історію. Ще у стародавності відлік часу ґрунтувався на періоді обертання Землі навколо своєї осі. До 1960 р. секунду визначали як $1/86400$ частину середньої сонячної доби, тобто еталоном часу була «Земля, що обертається навколо своєї осі». Але, як відомо, 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 $1/31556925,9744$ частини 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 р., 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» [12].

Неважко побачити, що при такому формулюванні секунда набула достатню визначеність, більшу точність, проте утратила відтворюваність (оскільки була прив'язана до певного року, який вже пройшов). Тому пошуки

найкращого еталона часу, а також конструкції годинників, за допомогою яких можна було б зберігати одиницю і шкалу часу, продовжувалися.

Значним подальшим кроком була розробка в 1927 р. 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.

Першим кроком у цьому напрямку було використання електромагнітного випромінювання молекул і створення молекулярних аміачних годинників (1953 р., Г. Ліукс), нестабільність ходу яких становила близько $1 \cdot 10^{-7}$. Усі подальші зусилля не дозволили знизити нестабільність менше $1 \cdot 10^{-8}$, 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 рр. XX ст. група вчених з NBS, США (нині NIST), створила квантовий генератор на основі цезію, в якому вдалося майже цілком уникнути ефекту Доплера. У перших моделях цезієвого генератора нестабільність становила близько $1 \cdot 10^{-9}$, але надалі її вдалося істотно знизити. Сучасні пучкові цезієві генератори (стандарти частоти) мають нестабільність на рівні 10^{-14} при відтворюваності частоти такого ж порядку.

Приблизно в ці ж роки були створені перші водневі квантові стандарти, що сьогодні, після серії вдосконалень, за рядом параметрів не поступаються цезієвим, зокрема, за стабільністю. Вважається, що цезієві генератори перевершують усі інші за відтворюваністю, що визначає систематичну похибку еталона, а водневі є найкращими за короткочасною (менше 1 доби) стабільністю (нестабільність $< 10^{-15}$). Саме тому сьогодні визначення і відтворення одиниці часу здійснюються через період випромінювання атомів цезію, а її збереження реалізується також 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»*. Це число (частота випромінювання, в герцах) прив'язує «цезієву» секунду до «тропічної». У

1997 р. Міжнародний комітет з мір та ваг вніс уточнення у це визначення, вказавши, що воно стосується температури нуль кельвіна.

Відповідно до визначення одиниці часу, її відтворення здійснюється цезієвим репером. Як відзначалось вище, відтворення одиниці часу і частоти за допомогою метрологічного цезієвого репера класичного пучкового типу відбувається з похибкою близько $1 \cdot 10^{-14}$. В останні роки створено цезієвий репер нової конструкції, що одержав назву «цезієвого фонтану», за допомогою якого досягнуто подальше зниження похибки відтворення секунди.

Таким чином, перехід до використання квантових ефектів і створення відповідних стандартів дозволив знизити похибки відтворення секунди за 50 років майже на 8 (!) порядків (рис. 2.1).

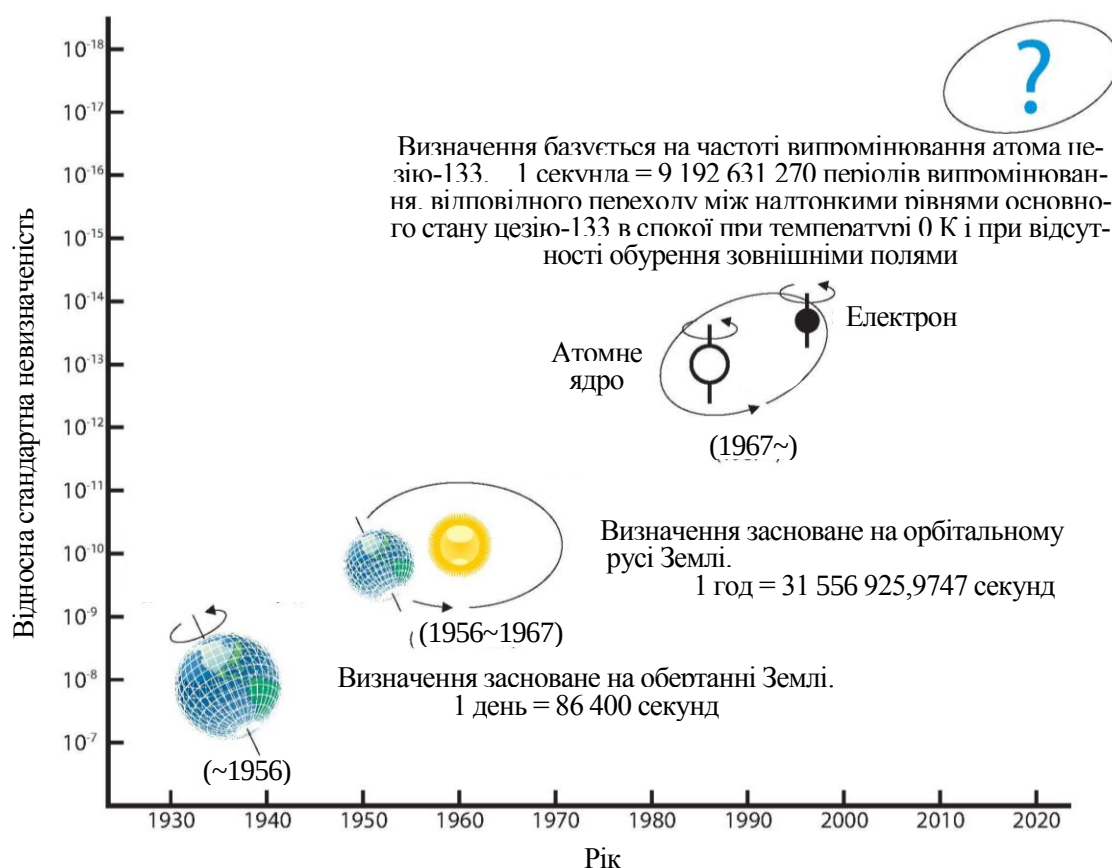


Рисунок 2.1 – Еволюція визначення і точності відтворення секунди

2.2. Фізичні основи квантових стандартів частоти

Принцип дії квантових стандартів частоти (КСЧ) базується на стабілізації частоти вихідного сигналу кварцового генератора за частотою елект-

ромагнітного випромінювання (або поглинання) при переході атомів речовини з одного енергетичного стану в інший. У КСЧ використовується той фундаментальний закон квантової механіки, що внутрішня енергія атомів і молекул може приймати ряд дискретних значень, специфічних для кожного типу атомів або молекул.

Сукупність цих значень, які зветься енергетичними рівнями або енергетичними станами, являє собою досить повну характеристику атома або молекули – *енергетичний спектр*. Переходи між енергетичними рівнями підкоряються закону збереження енергії.

Перехід супроводжується поглинанням або випромінюванням одного фотона (кванта електромагнітної енергії), частота якого ν визначається за допомогою квантомеханічної формули (1.1) (рис. 2.2).

$$\nu_{12} = \frac{(W_1 - W_2)}{h} \text{ або } \omega = 2\pi\nu = \frac{(W_1 - W_2)}{\hbar},$$

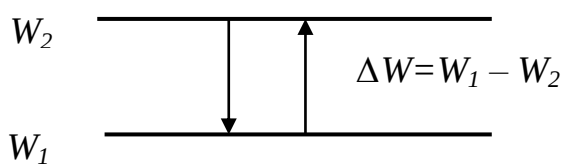


Рисунок 2.2 – Рівні квантового переходу

Висока стабільність частоти КСЧ визначається малою шириною ліній його спектра. Атомні переходи, що використовуються у більшості КСЧ, пов'язані зі зміною орієнтації магнітного моменту (спіну) валентного електрона атома. *Спін* – момент кількості руху мікрочастинки, який має квантову природу і не пов'язаний з рухом частинки як цілого; вимірюється в одиницях сталої Планка $\hbar = h/2\pi$ Дж·с. Позначимо спін електрона як μ_e . Ядро атома також має магнітний момент (спін), позначимо його як μ_j .

Електрон прецесує (обертається) навколо осі, яка збігається з напрямком магнітного поля ядра атома. Можливі дві орієнтації магнітного моменту електрона: за напрямком магнітного поля ядра атома і супроти поля (рис. 2.3).

Кожному стану відповідає визначений рівень енергії атома. При зміні орієнтації магнітного моменту електрона відбувається випромінювання або поглинання електромагнітної енергії ΔW . Зміна орієнтації магнітного моменту електрона відбувається під впливом зовнішнього електромагнітного по-

ля, частота якого збігається з частотою гіромагнітної прецесії електрона (ларморівська частота)

$$\omega_L = \mu_e H / \hbar_S,$$

де H – напруженість магнітного поля в місці знаходження валентного електрона; $\hbar_S$ – механічний крутильний момент електрона.

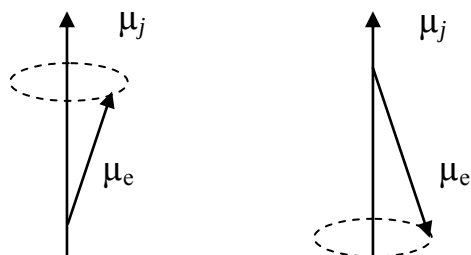


Рисунок 2.3 – Магнітні моменти (спіни) електрона і ядра

Електромагнітне поле у КСЧ створюється сигналом кварцового генератора, частота якого попередньо підвищується (шляхом множення) до частоти прецесії електрона. Оскільки у КСЧ використовується група атомів з якоюсь переважною орієнтацією магнітного моменту електрона, то при збіжності цих частот буде випромінюватись або поглинатись енергія. При неточній збіжності частот спостерігається залежність енергії від частоти настройки, яка використовується для створення сигналу помилки і автоматичного підстроювання частоти кварцового генератора під частоту прецесії електрона [13].

За принципами побудови КСЧ підрозділяються на стандарти з квантовим генератором, або активні, і стандарти з квантовим дискримінатором, або пасивні.

До активних КСЧ відносять стандарти на аміаку, формальдегіді, атомарному і ціаністому водні, рубідії. До пасивних КСЧ належать стандарти на цезії, рубідії і талії.

2.3. Молекулярний і рубідієвий стандарти частоти

2.3.1. Квантовий молекулярний генератор на аміаку

Принцип дії генератора полягає у використанні індукованого випромінювання збуджених молекул аміаку (рис. 2.4).

Пучок молекул аміаку NH_3 , сформований джерелом, поступає через сортувальну систему у резонатор. У резонаторі молекули випромінюють свою енергію. Якщо ця енергія перевищує енергію витрат, виникають коливання. Для того, щоб пучок молекул не руйнувався при зіткненні з залишковим газом, у генераторі створюється необхідне розрідження за допомогою вакуумної системи.

У молекулярному генераторі використовується квантовий перехід між так званими обертально-інверсійними рівнями молекул аміаку.

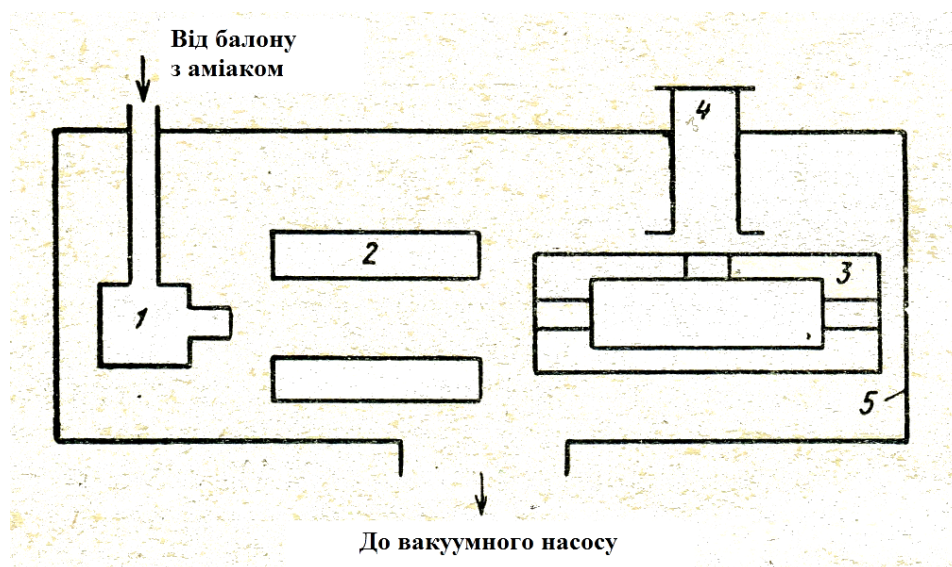


Рисунок 2.4 – Спрощена схема квантового генератора на аміаку

1 – джерело молекулярного пучка; 2 – сортувальна система; 3 – НВЧ-резонатор;
4 – вихід НВЧ-потужності; 5 – корпус

Частота переходу складає 23870,129 МГц. Відтворюваність частоти сучасних МГ оцінюється числом $(1 - 3) \cdot 10^{-11}$, довгочасна нестабільність (за добу) $5 \cdot 10^{-11}$, короткочасна нестабільність (за 1 с) $(1 - 3) \cdot 10^{-12}$.

Молекулярні генератори були першими квантовими генераторами, які використовувались для відтворення одиниць часу і частоти, вони зіграли важливу роль у розвитку цієї галузі вимірювань.

2.3.2. Рубідієвий стандарт частоти

Стандарт частоти рубідієвий (СЧР) може бути як активного типу (генератор), так і пасивного (дискримінатор). Найбільш широко використовується пасивний стандарт, структурна схема якого наведена на рис.2.5.

У пасивному СЧР використовується атомний перехід $F=2, m_F=0 \leftrightarrow F=1, m_F=0$ (0–0 перехід) у надтонкій структурі основного стану атома ^{87}Rb на частоті $f=6834,68$ МГц.

Принцип дії *рубідієвого дискримінатора (РД)* полягає у використанні оптичної накачки і оптичної індикації в парах рубідію. Чарунка з парами Rb^{87} знаходиться в резонаторі, настроєному на частоту 0 ~ 0 переходу.

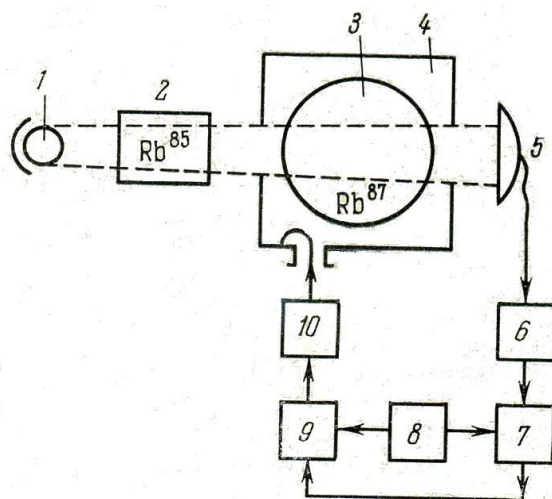


Рисунок 2.5 – Структурна схема пасивного РСЧ з оптичною накачкою:
1 – лампа з ^{87}Rb ; 2 – фільтр; 3 – чарунка; 4 – резонатор; 5 – фотодетектор;
6 – підсилювач НЧ; 7 – фазовий детектор; 8 – генератор НЧ; 9 – кварцовий генератор; 10 – помножувач частоти.

Світло від газоразрядної лампи з Rb^{87} проходить через фільтр, чарунку і попадає на фотодіод, який контролює поглинання оптичного випромінювання в чарунці. Резонатор збуджується НВЧ-випромінюванням від помножувача частоти, на вхід якого подається сигнал кварцового генератора, частота якого підстроюється за допомогою системи ФАПЧ.

В активному стандарті частоти оптична накачка забезпечує виконання умов самозбуджування. Сигнал, що генерується в резонаторі, приймається приймачем НВЧ, переноситься на проміжну частоту і за допомогою системи ФАПЧ підстроює частоту кварцового генератора.

Варто підкреслити, що рубідієві стандарти частоти і часу є *найбільш технологічними* з усіх існуючих квантових стандартів частоти радіодіапазону (при достатньо високих метрологічних характеристиках). Але в останні роки темпи зростання цих характеристик значно сповільнилися, і розвиток СЧР йшов в основному шляхом зниження їх габаритів, маси і споживаної потужності. Ці тен-

денції зумовлені, перш за все, тим, що традиційний принцип побудови СЧР з оптичною накачкою, що використовує випромінювання спектральної лампи на парах рубідію, значною мірою вичерпав себе, і прогрес у характеристиках йде шляхом пошуку та знаходження інженерних, конструктивних і технологічних рішень. У той же час існує стійка потреба у підвищенні метрологічних характеристик СЧР, перш за все, для служби часу, глобальних навігаційних супутникових систем позиціювання об'єктів і телекомунікаційних систем.

Очевидно, що розв'язання даного завдання лежить на шляху використання нових фізичних принципів, одним із яких є *оптична накачка за допомогою напівпровідникових лазерів (НЛ)*. Застосування НЛ обумовлено цілою низкою причин, серед яких головними є їх мініатюрність, простота управління випромінюванням, висока ефективність перетворення енергії накачування в когерентне випромінювання. У даний час актуальною роботою, що пов'язана з розвитком технології використання НЛ, є створення СЧР на основі ефекту «когерентного полонення населеності», принцип дії якого багато в чому подібний до дії традиційного стандарту частоти з лазерною накачкою. Головною позитивною рисою даного методу є відсутність безпосереднього впливу НВЧ-поля на Rb^{87} комірку поглинання, що дозволяє відмовитися від НВЧ-резонатора і тим самим різко знизити розміри квантового дискримінатора.

Наведені дані і останні результати досліджень свідчать про те, що можливості рубідієвих СЧР далеко не вичерпані.

2.4. Квантовий стандарт частоти на цезії

Оскільки і визначання, і первинний еталон секунди базуються сьогодні на частоті квантового переходу в цезії, розглянемо КСЧ на цезії докладніше.

З урахуванням можливих взаємних орієнтацій магнітних моментів ядра атома і електрона (див. рис. 2.3) наведемо схему орієнтації для атома цезію-133. Ядро цезію має спін з квантовим числом $j = 7/2$, а спін електрона – $e = 1/2$. Сумарний магнітний кутовий момент характеризується числом $F = 7/2 + 1/2 = 4$ або $F = 7/2 - 1/2 = 3$ залежно від взаємної орієнтації спінів ядра і електрона (рис. 2.6). Різниця енергій цих двох станів атома $\Delta W = h\nu_0$ (ν_0 – частота випромінювання, яка для цезію-133 складає 9192631770 Гц).

На рис. 2.7 наведено схему енергетичних рівнів основного стану атома цезію - 133, розщепленого на 2 надтонких рівня. Верхньому відповідає $F=4$,

а нижньому – $F=3$. Верхній рівень розщеплюється на 9, а нижній – на 7 магнітних підрівнів.

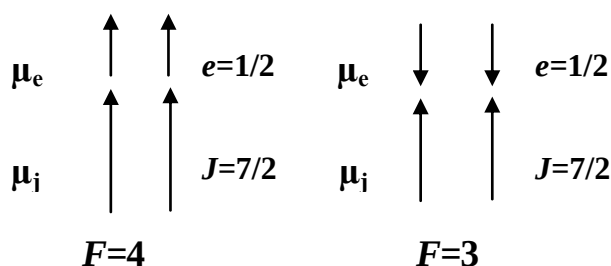


Рисунок 2.6 – Схеми орієнтації спінів ядра і електрона для атома цезію-133

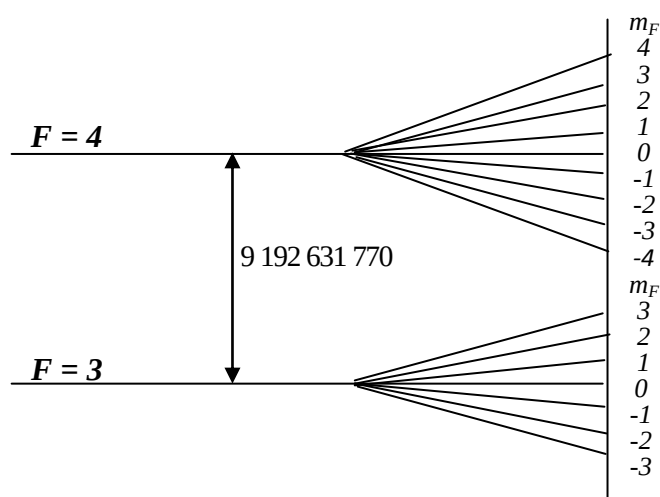


Рисунок 2.7 – Схема енергетичних рівнів атома цезію-133

Спрощена структурна схема еталона на цезієвому випромінюванні наведена на рис. 2.8.

Еталон побудовано на фізичному явищі резонансного поглинання електромагнітного випромінювання в цезії, під частоту якого підстроюється помножена частота генератора гармонічних коливань (як правило, кварцового) за допомогою системи автопідстроювання частоти. Таким чином, частота цезієвого випромінювання є опорою для стабілізації частоти кварцового генератора.

Розглянемо докладніше дію цезієвої атомно-променевої трубки (див. рис. 2.8).

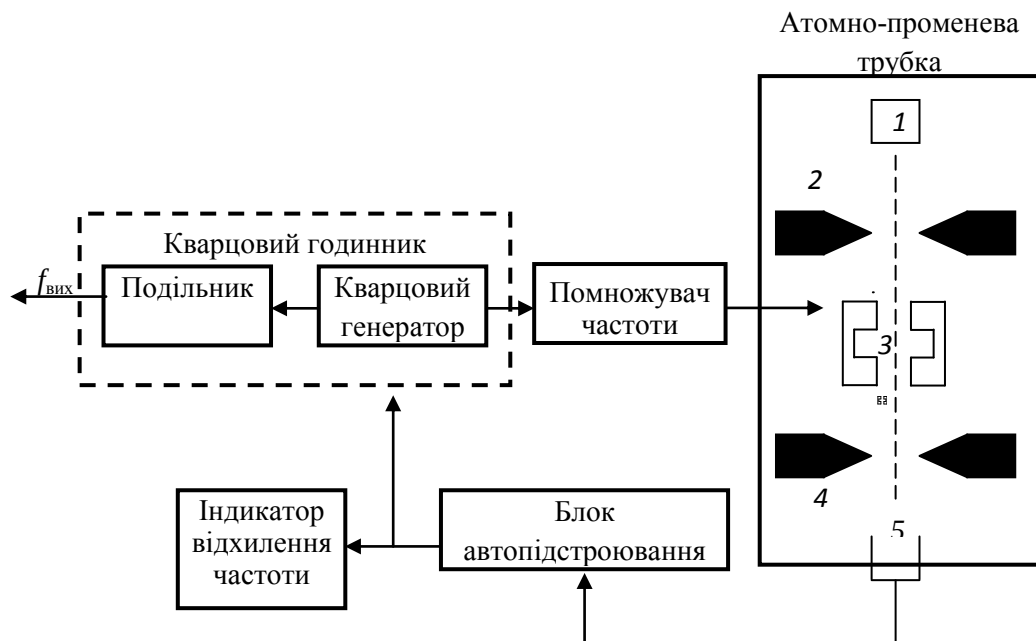


Рисунок 2.8 – Структурна схема цезієвого репера:
 1 – джерело атомів цезію-133 (цезієва піч); 2, 4 – магніти;
 3 – резонатори; 5 – детектор

У вакуумній камері розміщується цезієва піч 1 з температурою близько 100 °С, дві системи магнітів 2 і 4, що виконують функції селекторів стану атомів, два НВЧ-резонатори 3 і детектор 5. Пучок атомів цезію у вигляді стрічки товщиною близько 0,5 мм емітується піччю і проходить через магнітне поле в магніті 2. Атоми з магнітним моментом $F=4$ відхиляються градієнтом магнітного поля, а атоми з моментом $F=3$ не відхиляються (це забезпечується конструкцією полюсів). Далі пучок атомів послідовно проходить через два НВЧ-резонатори, відстань між якими складає близько 1 м. Поміж резонаторів пучок проходить через коліматор, який формує вузький паралельний потік частинок. У резонаторах на потік атомів діє змінне магнітне поле частотою ~ 9192 МГц, яке викликає перехід кожного атома на інший енергетичний рівень. НВЧ-магнітне поле в резонаторах строго сфазоване. Атоми, що поглинули або випромінили квант енергії у просторі між магнітами, змінюють орієнтацію свого магнітного моменту і відхиляються у протилежному напрямку градієнтом поля магніту 4. Атоми, що не отримали змін, відхиляються вдруге і не попадають на детектор.

Слід відзначити, що якщо просто направляти електромагнітне випромінювання необхідної частоти на атоми цезію, то бажаний ефект не виявиться, оскільки при цьому будуть з однаковою ймовірністю відбуватися поглинання і випромінювання в атомах. Це приведе до того, що рівень па-

даючого випромінювання не зміниться. Саме дворезонаторний метод, запропонований американським фізиком Рамзеєм (N. F. Ramsey), дозволяє одержати бажаний результат. Детектор, на який падає потік атомів цезію, включає нагрітий вольфрамовий дріт. Атоми, що попадають на нього, іонізуються. Іони, що утворились, прискорюються, фокусуються системою електронів і попадають в електронний помножувач, вихідний струм якого залежить від числа атомів, з якими відбувся перехід. Оскільки в цезієвій трубці використовується рамзеєвський резонатор з рознесеними областями взаємодії, резонансна крива переходу має складну форму у вигляді середнього максимуму і двох бокових пелюстків (рис. 2.9).

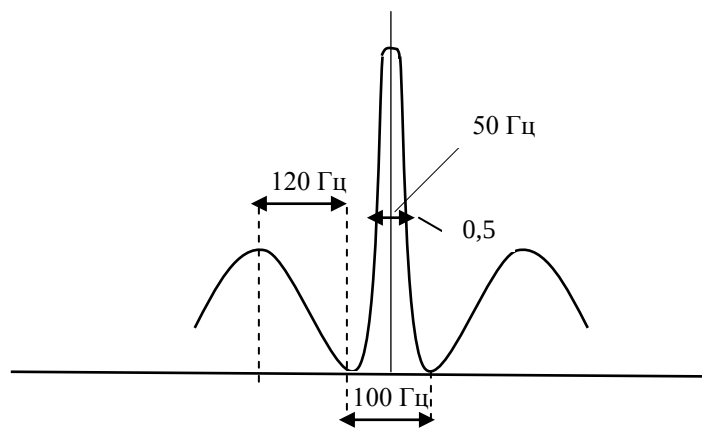


Рисунок 2.9 – Форма резонансної кривої (спектральної лінії) цезієвого переходу

Ширина лінії обернено пропорційна часу прольоту атомів між резонаторами і визначається співвідношенням (Гц) $\Delta f = 0,65 V/D$, де V – середня швидкість атомів; D – відстань між резонаторами. На рівні 0,5 максимуму ширина лінії складає близько 50 Гц. Вихідний струм детектора (сигнал помилки) підстроює частоту кварцового генератора, а помножена частота кварцового генератора підводиться до резонаторів. Так замикається кільце системи автоматичного підстроювання частоти (АПЧ), опорною частотою в якій є частота резонансного поглинання електромагнітної енергії в атомах цезію (див. рис. 2.8).

Цезієвий репер як еталон часу і частоти був створений у 50-ті роки минулого століття і постійно удосконалювався. Вважається, що потенціал точності репера класичного пучкового типу знаходиться в одиницях 14-го знака.

2.5. Квантовий стандарт частоти на атомах водню

Як відзначалося вище, КСЧ на атомах водню є активним пристроєм, тобто водневий стандарт частоти відіграє роль генератора (мазера).

Структурна схема КСЧ з використанням водневого квантового генератора наведена на рис. 2.10.

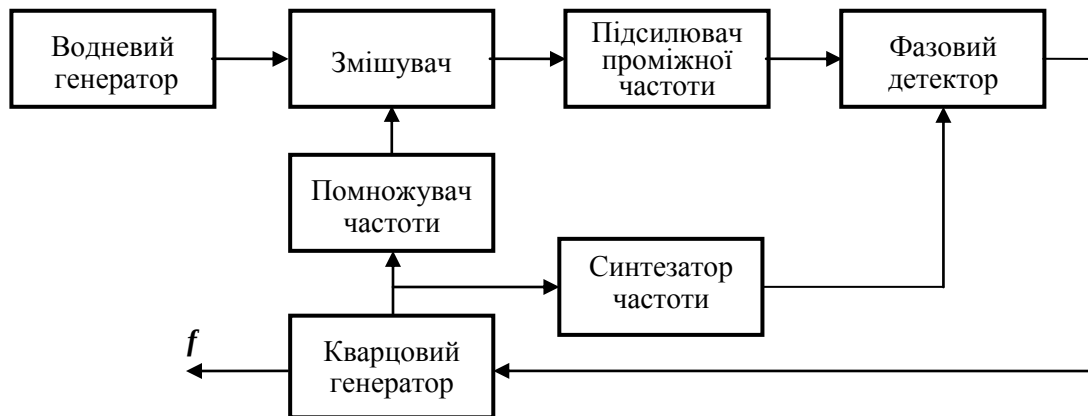


Рисунок 2.10 – Структурна схема КСЧ з використанням водневого генератора

Сигнал кварцового генератора помножується за частотою і подається на змішувач, на другий вхід якого надходить сигнал водневого генератора. Сигнал проміжної частоти з виходу змішувача підсилюється і подається на фазовий детектор, в якому він порівнюється за фазою з сигналом синтезатора частоти. Сигнал помилки з виходу фазового детектора використовується для підстроювання частоти кварцового генератора під частоту квантового водневого генератора. Розглянемо більш докладно роботу водневого генератора.

Вихідними даними для схеми водневого генератора (мазера) є різниця енергій між двома надтонкими рівнями атома водню в основному стані. Оскільки спин протона дорівнює $1/2$, а повний момент J атомарного водню в основному стані також дорівнює $1/2$, то $F=0$ і $F=1$ (рис. 2.11), чому відповідають значення m_F , що дорівнюють 0 або $0, \pm 1$ (рис. 2.12).

У водневому лазері використовується перехід $F=1, m_F=0 \rightarrow F=0, m_F=0$ між підрівнями надтонкої структури основного стану атома водню, який виникає в результаті взаємодії спину електрона і спину ядра. Частота цього переходу складає $1\,420\,405\,750$ Гц. Сортування атомів за енергетичними рівнями відбувається в неоднорідному полі сортувального магніту, який

складається з парної кількості розташованих по колу металевих стрижнів, на які подаються потенціали різних полярностей. Атоми, що мають більшу енергію, направляються в резонатор, атоми з меншою енергією, розкидаються в бік. Структурна схема мазера наведена на рис. 2.13.

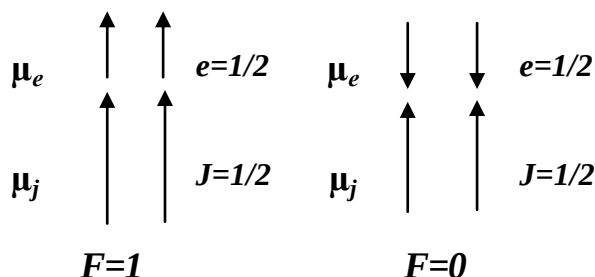


Рисунок 2.11 – Схема орієнтації спінів ядра і електрона

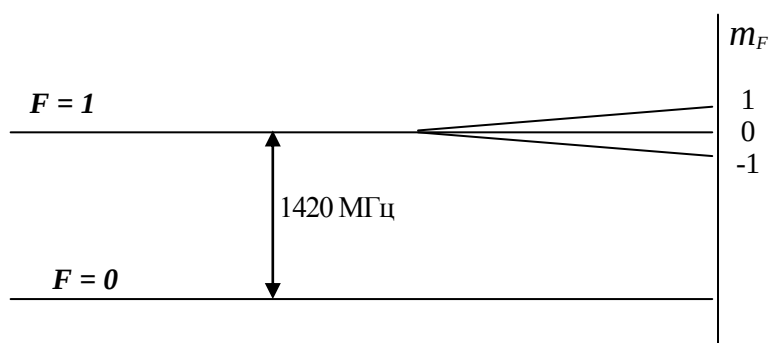


Рисунок 2.12 – Енергетичні рівні атома водню 0

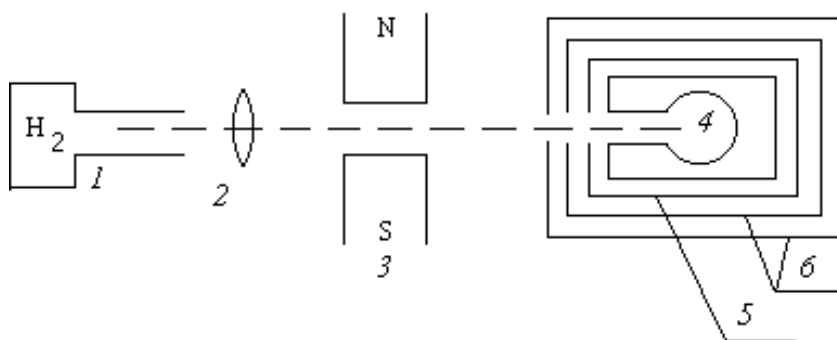


Рисунок 2.13 – Структурна схема водневого генератора:

1 – балон з воднем; 2 – коліматор; 3 – осьовий магніт;
4 – накопичувальна чарунка; 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

багатополісного осевого магніту 3, де він проходить просторове сортування (сепарацію). У результаті останньої на вхід накопичувальної чарунки 4, розташованої в об'ємному резонаторі 5, потрапляють лише атоми водню, що перебувають на потрібному енергетичному рівні. Високодобротний резонатор, що знаходиться усередині багат шарового 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 резонансній частоті 1 420 405 750 Гц. Це викликає самозбудження генератора, частота якого відзначається високою стабільністю.

При створенні водневого мазера виникає необхідність подолання цілого ряду експериментальних труднощів. У принциповому плані він дає більш вузьку спектральну лінію і дозволяє досягти меншої короткочасної нестабільності частоти, ніж цезієвий репер. Але за відтворюваністю (від включення до включення, від екземпляра до екземпляра), а також за довгочасовою стабільністю більш високі показники має цезієвий репер. Крім того, останній є більш простим у регулюванні та експлуатації. Тому при відтворенні секунди саме йому надано перевагу.

Орієнтовні порівняльні характеристики різних типів квантових стандартів часу – частоти наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння різних видів КСЧ

Тип квантового стандарту	Тип переходу, акт./пасив.	Частота, МГц	Розшир. невизначеність	Позитивні риси	Недоліки	Основне використання
Цезієвий стандарт (пучковий)	Надтонкий, пасивний	9192,63177 0	$1 \cdot 10^{-14}$	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	Потребують 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

2.6. Первинні еталони одиниць часу і частоти та перспективи їх розвитку

Оскільки сучасне визначення секунди ґрунтується на періоді випромінювання при атомному переході в цезії-133, то природно, що основу первинного еталона складає цезієвий репер. Але функціональні можливості еталона мають бути значно ширшими для відтворення секунди, тому до складу первинних еталонів часу і частоти розвинутих країн, як правило, входять такі системи, що забезпечують виконання його основних функцій [14], а саме:

- апаратура відтворення і збереження одиниць часу і частоти, основними пристроями якої є цезієвий репер і водневі стандарти частоти;
- апаратура формування і збереження шкал атомного і координованого часу;
- система внутрішніх звірянь для проведення взаємних звірянь частот і сигналів часу різних зберігачів і проведення їхнього коригування (фазові і частотні компаратори, вимірювачі характеристик сигналів тощо);
- система зовнішніх звірянь, що забезпечує передачу розмірів одиниць і шкали часу вторинному і робочому еталонам, а також звіряння національної шкали зі шкалами часу інших країн. Це можуть бути спеціальні навігаційні системи, телевізійна апаратура, радіометеорна система, апаратура фазових звірянь, транспортабельний квантовий годинник.

Крім того, до складу первинних еталонів деяких країн входить комплекс апаратури радіооптичного частотного моста (РОЧМ), що являє собою систему переносу стабільних частот з радіочастотного в оптичний діапазон. Це важливо для багатьох областей науки і техніки, зокрема, для створення єдиного еталона часу – частоти – довжини, про що буде сказано нижче.

Структурна схема еталона зображена на рис. 2.14.

Наведемо основні метрологічні характеристики державного еталона часу і частоти України [15]:

- 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;
- СКВ відтворення одиниць – не більше $1 \cdot 10^{-14}$;
- НСП відтворення – не більше $5 \cdot 10^{-14}$;
- невизначеність (розширена) – не більше $1 \cdot 10^{-13}$.

Як було сказано вище, вважається, що потенціал точності класичного

цезієвого репера пучкового типу знаходиться поблизу $1 \cdot 10^{-14}$, а основне обмеження пов'язане з взаємним рухом 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 один-два порядки. Поєднання ідей цезієвого репера вертикальної конструкції і лазерного охолодження привело до створення в ряді країн так званого «цезієвого фонтану» (рис. 2.15). Назва виникла через фонтаноподібний політ пучка атомів цезію, що реалізовано в цьому репері. Атоми, що емітуються цезієвим джерелом, накопичуються і охолоджуються в магнітооптичній камері. Потім сконцентрований пучок підкидається уверх силою магнітної взаємодії з фотонами лазерного променя і далі, після вимикання лазера, під дією гравітації повертається вниз, пролітаючи двічі через НВЧ-резонатор.

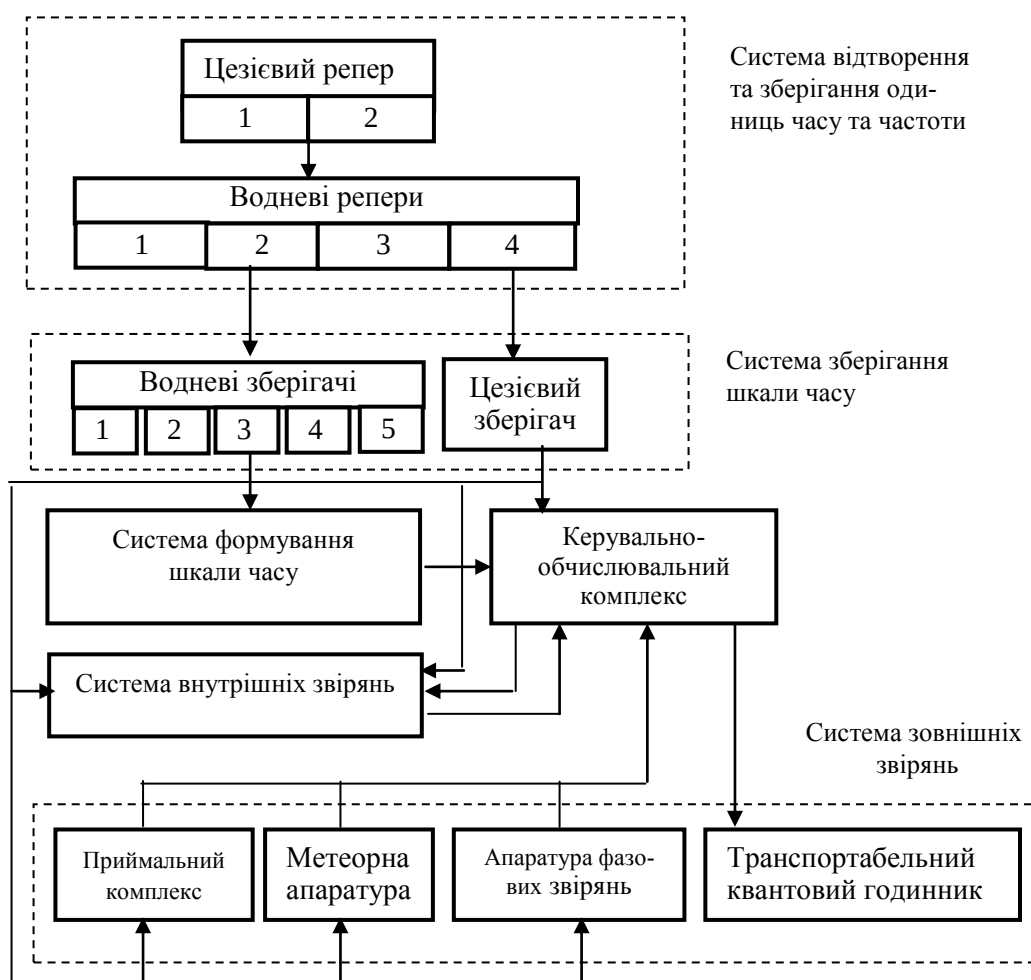


Рисунок 2.14 – Структурна схема первинного еталона часу і частоти

Подвійне проходження одного резонатора пучком атомів цезію позбавляє необхідності розв'язання задачі фазування, що притаманне рамзеевській схемі з двома резонаторами.

Цезієвий фонтан дозволяє знизити нестабільність частоти до декількох одиниць шістнадцятого знака за рахунок зниження практично до нуля теплового руху атомів.

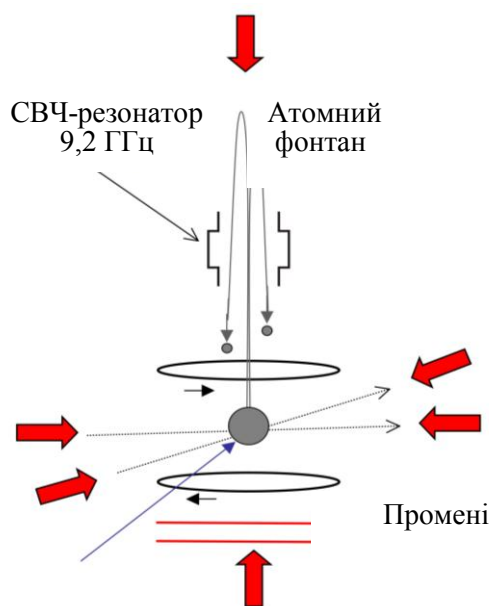
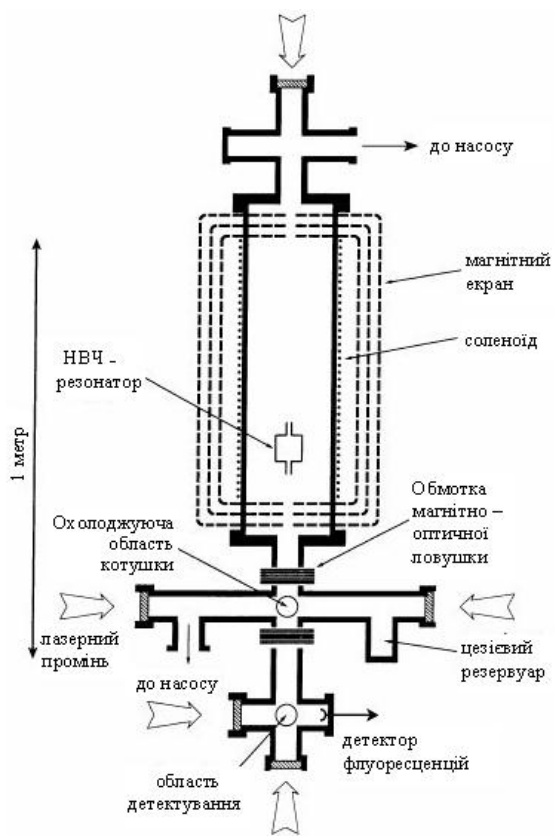


Рисунок 2.15 – Принцип дії цезієвого фонтана

Так, у Національному інституті стандартів і технологій (NIST) США і в Національній фізичній лабораторії (NPL) Англії були створені цезієві репери з невизначеністю близько $3 \cdot 10^{-16}$. Структурну схему та зовнішній вигляд цезієвого фонтана NPL наведено на рис. 2.16.

Але ще більш перспективними вважаються стандарти частоти, що працюють не в радіочастотному, а в оптичному діапазоні, зокрема, на переходах у стронції, ітербії і ртуті. З'явилися публікації про створення в РТВ (Німеччина) стронцієвого стандарту частоти на частоті 429 ТГц (оптичний діапазон) з невизначеністю на рівні $(2 - 3) \cdot 10^{-16}$.

В експериментальному зразку стронцієвих оптичних годинників, розроблених у Токійському університеті, іони стронцію знаходяться в оптичній пастці на перехресті шести лазерних променів, під впливом яких вони утримуються в «енергетичних ямах», майже не взаємодіючи і випромінюючи світло надзвичайно стабільної частоти (рис. 2.17).



а



б

Рисунок 2.16 – Цезієвий фонтан NPL:
а – структурна схема; *б* – зовнішній вигляд

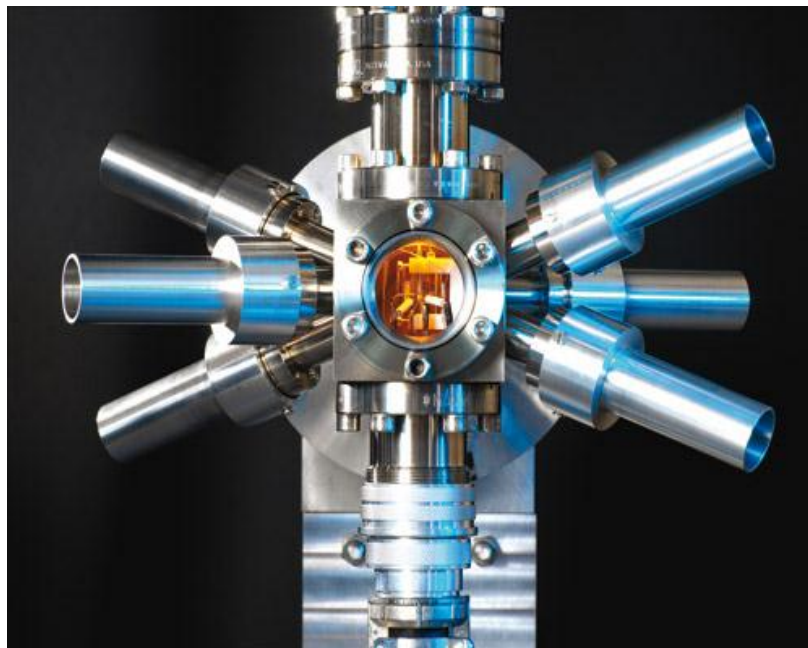


Рисунок 2.17 – Оптичний годинник на іонах стронцію

Невизначеність відтворення секунди складає близько $1 \cdot 10^{-16}$. Прогнозується можливість подальшого зниження невизначеності відтворення часу (частоти) на основі цієї методики до рівня 10^{-17} – 10^{-18} [16].

2.7. Одиниці і шкали часу

У 1884 р. на Міжнародній конференції у Вашингтоні була прийнята рекомендація щодо «нульового Гринвіцького меридіана». За цією рекомендацією земна куля поділялась на 24 пояси по 15° , кожному з яких приписувався свій час, що відрізнявся від *середнього сонячного часу* на Гринвіцькому меридіані на цілу кількість годин. Границі практичних часових поясів відрізняються від «теоретичних» і проходять зазвичай по державних і адміністративних кордонах.

У 1928 р. було введено поняття «*всесвітнього часу*» для позначення середнього сонячного часу за Гринвічем з відрахуванням від півночі.

На точність астрономічного визначення часу впливають два основних фактори: коливання Землі відносно своєї осі («нутація» полюса), а також сезонні зміни швидкості обертання Землі. Середня сонячна секунда дорівнює $1/86400$ частині середньої сонячної доби.

Всесвітній час UT0 – нерівномірна шкала часу, тривалість секунди в якій протягом доби дорівнює середній сонячній секунді, а відлік часу починається від моменту кульмінації «середнього Сонця» на Гринвіцькому меридіані.

Всесвітній час UT1 – нерівномірна шкала часу, що відрізняється від *UT0* поправкою на коливання полюса Землі.

Всесвітній час UT2 – шкала приблизно рівномірного часу, що відрізняється від *UT1* поправкою на сезонну нерівномірність обертання Землі.

У 1956 р. МКМВ рекомендував використовувати як основну одиницю часу *ефемеридну секунду*. Шкала ефемеридного часу теоретично рівномірна і прив'язана до орбіти 1900 р., однак через труднощі її безпосереднього визначення ця шкала широкого практичного застосування не набула.

З розробкою квантових стандартів частоти і введенням діючого на сьогодні визначення секунди з'явилась рівномірна *шкала атомного часу*. Використовуються дві шкали атомного часу: 1) *шкала рівномірного атомного часу TA(i)*, 2) *шкала координованого часу UTC(i)*. У першій тривалість секунди дорівнює атомній секунді *TA(i)*. Початок відліку в атомній шкалі підсу-

мовується з визначеною датою шкали всесвітнього часу $UT2$.

За шкалою $UTC(i)$ ведуться передачі сигналів точного часу і частот за допомогою радіо- і телевізійних каналів. У цій шкалі секунда дорівнює секундi $TA(i)$, а початок відліку може змінюватися рівно на 1 с з першого числа кожного місяця. Введення в практику такої шкали дозволяє одночасно задовольняти вимоги споживачів до незмінності розміру одиниць часу – частоти і до знання всесвітнього часу на час приймання сигналів часу, що передаються по лініях зв'язку.

Висновки

- До 1967 р. визначення секунди було пов'язане з астрономічними явищами і пройшло такі етапи:

Секунда є $1/86400$ частина сонячної доби, тобто еталоном секунди була *«Земля, що повертається навколо своєї осі»*. Це визначення існувало до 1956 р., а відносна похибка відтворення секунди складала близько 10^{-7} .

Секунда є $1/31556925,9744$ частина тропічного року, за початок якого було прийнята 12 година 0 січня 1900 р., що відповідає 12 годині 31 грудня 1899 р. Еталоном секунди стала *«Земля, що обертається навколо Сонця»*, а похибка визначення секунди знизилась до 10^{-10} .

- З 1967 р. секунда стала визначатись через частоту (період) випромінювання надтонкого переходу в ізотопі цезію-133, що означало початок ери «атомного часу». Поступово, шляхом удосконалення цезієвого репера і іншої апаратури первинних еталонів вдалось знизити похибку (невизначеність) відтворення секунди до $1 \cdot 10^{-14}$ (вісімдесяти роки минулого століття).

- Наступним кроком став перехід від класичного пучкового цезієвого репера до так званого «цезієвого фонтана» і охолодження атомів, що дозволило знизити невизначеність до кількох одиниць на 10^{-16} (2005 р., РТВ, NIST).

- Напрямок подальшого удосконалення еталонів часу-частоти є створення квантових стандартів частоти в оптичному діапазоні. В деяких країнах (Японія, США) розроблено дослідні зразки стронцієвих годинників на частоті 429 ТГц (2010 р.), які мають невизначеність на рівні 10^{-16} ; прогнозується можливість її зниження до 10^{-17} – 10^{-18} .

- Вимірювання часу і частоти – область вимірювань, де вперше і дуже яскраво виявились переваги квантових методів і технологій, використання

яких дозволило за кілька десятиліть у тисячі разів підняти точність відтворення одиниць часу і всіх частотно-часових вимірювань.

Контрольні питання

1. Що розуміється під *астрономічною і квантовою секундами*?
2. Які етапи визначення *астрономічної секунди* ви знаєте?
3. Який фізичний ефект лежить в основі квантових стандартів частоти?
4. Поясніть принцип побудови *цезієвого* репера частоти.
5. Що ви знаєте про *водневий* квантовий генератор?
6. Що таке *кварцовий і квантовий* генератори?
7. Назвіть основні системи первинного еталона часу – частоти.
8. Які завдання вирішує *система зовнішніх звірень* еталона?
9. Назвіть сучасне визначення секунди в SI.
10. Що означає число 9 192 631 770 у визначенні секунди?
11. Які орієнтовні метрологічні характеристики має первинний еталон часу і частоти України?
12. Що таке *цезієвий фонтан*?
13. Що таке *радіооптичний частотний міст*?
14. В якому напрямку іде подальше удосконалення еталонів часу – частоти?

Розділ 3

МЕТР: ВІД АРТЕФАКТУ ДО «СВІТЛОВОГО» МЕТРА

3.1. Коротка історія

Наприкінці XVIII ст., у період введення метричної системи мір, Національні збори Франції прийняли *одну десятимільйонну частину чверті Паризького меридіана* як одиницю довжини – метр. У 1799 р., на основі геодезичних вимірювань (тріангуляцій) частини дуги меридіана від Дюнкерка до Барселони експедиціями вчених на чолі з Мешеном і Деламбром, 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.

Повторні вимірювання довжини дуги меридіана, виконані у XIX ст., довели, що довжина прийнятого метра дещо коротша від справжнього «природного» метра. Оскільки надалі, при більш точних вимірюваннях, імовірно, можна було б одержати різні значення основної одиниці довжини, Міжнародна комісія з прототипів метричної системи, створена з ініціативи Петербурзької Академії наук, у 1872 р. вирішила відмовитися від природного еталона метра і прийняти як вихідну міру метр Архіву. Відповідно до рішення цієї комісії був виготовлений 31 еталон метра у вигляді штрихової міри зі сплаву платини й іридію. З них метр номер 6 виявився при 0 °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 мав у поперечному перерізі форму Х.

Одиниця довжини – метр – визначається відстанню між осями двох середніх штрихів, нанесених на бруску, при 0 °C. 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. Це пояснюється тим, що металеві стрижні, які піддалися раніше термічному і механічному обробленню, одержують внутрішні напруження, що викликають повільні мікрокристалічні зміни їх структури. При періодичних звіреннях національних еталонів з міжнародним прототипом не

можна виявити малих змін їхньої довжини, тому що всі еталони виготовлені з того самого сплаву і, отже, зазнають тих самих змін. Крім того, штрихи, нанесені на бруски, мають деяку ширину, що призводить до похибки звірення на рівні 10^{-7} м.

У 1895 р. II Генеральна конференція з мір та ваг визнала, що природним носієм розміру метра може бути довжина хвилі монохроматичного світла. У 1927 р. ГКМВ установила таке визначення метра: *«1 метр дорівнює 1553164,13 довжини хвилі червоної лінії кадмію при певних умовах...»*

Після подальшого вивчення спектральних ліній ряду елементів було знайдено, що найбільшу точність відтворення одиниці довжини забезпечує оранжева лінія ізотопу криптону-86 (довжина хвилі 605,8 нм). 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 елементи з парним номером у таблиці Менделєєва і парною атомною масою (так звані парно-парні елементи) мають лінії спектра з простим контуром. Найбільш тонкі і симетричні лінії випромінювання відповідають переходу між вищезгаданими рівнями атома криптону-86.

Метр у довжинах світлових хвиль відтворюється інтерференційним методом на спеціальній установці за допомогою лампи, заповненої ізотопом криптону-86.

При цьому капіляр, у якому відбувається світіння збуджених атомів, має оптичний вихід на компаратор, за допомогою якого визначається кількість довжин хвиль, що укладаються між штрихами міри (лінійки), тобто довжина. Точність цього методу обмежувалась шириною криптонової лінії, яка складала до 500 МГц, через так звану спонтанну емісію. Крім того, ця лінія є несиметричною, внаслідок чого виникло питання, як визначати метр – за максимумом резонансної лінії чи за центром тяжіння? Через це не вдається знизити похибку відтворення метра менше $4 \cdot 10^{-9}$ м (СКВ). Однак цієї точності виявилось недостатньо для розв'язання ряду науково-технічних завдань. Пошуки кращого еталона продовжувалися.

3.2. Лазер і «світловий» метр

Поява газових лазерів привела до перевероту в оптичних інтерференційних методах вимірювання. Лазерне джерело дає значно більш інтенсивне випромінювання в порівнянні з джерелами зі спонтанною емісією (яким є криптонова лампа), що дозволяє реалізувати значно більше відношення сигнал/шум. Ширина спектральної лінії гелій-неонового лазера (довжина хвилі 0,63 мкм, частота 473 ТГц) може бути зменшена до 1 кГц. Завдяки цьому спостереження інтерференції стає можливим у значно більш широких діапазонах відстаней при збереженні високої контрастності інтерференційних смуг.

Таким чином, вже через декілька років після появи газові лазери знайшли широке використання у прецизійних вимірюваннях довжини інтерференційним методом. Природно, повстало питання про заміну в еталоні метра криптонового джерела лазерним. Після знаходження шляхів стабілізації частоти лазерів, розробки методів точного вимірювання їх частоти (яка лежить в оптичному діапазоні), а також успіхів в уточненні фундаментальної сталої – швидкості світла – стало можливим ввести нове визначення метра.

У 1983 р. XVII Генеральна конференція з мір та ваг прийняла таке визначення метра: «*Метр – одиниця довжини, що дорівнює шляху, який проходить у вакуумі світло за $1/299792458$ частку секунди*». При цьому швидкість світла постулюється рівною 299292458 м/с (точно), а метр визначається зі співвідношення $L = V \cdot t$, де $V = c$ – швидкість світла; $t = 1/299792458$ с.

Дане визначення принципово відрізняється від визначення 1960 р.: новий метр спирається на еталон часу і відоме значення швидкості світла (сталу), що створює передумови для створення єдиного еталона часу–частоти–довжини [14].

Міжнародне бюро мір та ваг розробило також рекомендації щодо побудови джерел еталонного випромінювання, методів їх стабілізації, параметрів посилюючих та поглинаючих елементів тощо при побудові первинних еталонів. Так, за таке джерело рекомендовано використовувати гелій-неоновий лазер, стабілізований за поглинанням в йоді з довжиною хвилі $\lambda=633$ нм (частота ~ 473 ТГц). Тоді в самому загальному вигляді схема еталона довжини має вигляд, наведений на рис. 3.1. Неважко бачити, що він складається з трьох основних систем: еталонного джерела світлової хвилі, системи вимірювання абсолютної частоти цього джерела з простежуваністю до первинного еталона часу – частоти, системи передавання розміру одини-

ці матеріальним мірам (штриховим і кінцевим) поблизу 1 м. Створення цих систем дозволило зменшити похибку відтворення одиниці довжини до кількох одиниць одинадцятого знака, а також створити єдиний еталон одиниць часу – частоти – довжини.

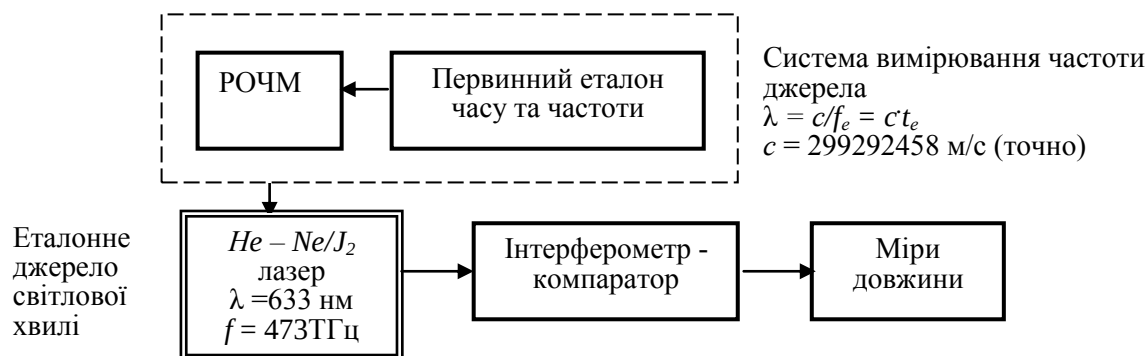


Рисунок 3.1 – Спрощена схема еталона одиниці довжини

Шляхи побудови такого еталона і його апаратне вирішення розглянуто нижче.

3.3. Первинний еталон метра

Передумовами переходу на визначення метра через довжину світлової хвилі були:

- створення джерел когерентного високостабільного випромінювання в оптичному діапазоні – лазерів, зокрема газових;
- досягнення високої точності і достовірності вимірювання швидкості світла (похибка близько $1 \cdot 10^{-10}$), що дало змогу зафіксувати його значення і користуватись цим значенням як фундаментальною сталою, відомою точно;
- розробка методів і засобів прямого вимірювання частоти лазерного випромінювання видимого діапазону.

Розглянемо ці питання більш докладно.

3.3.1. Еталонне джерело світлового випромінювання

Теоретичні основи створення ОКГ (лазера) розробили російські вчені Н. Г. Басов і А. М. Прохоров, а також незалежно від них американські вчені А. Шавлов і У. Таунс (Нобелівська премія). Перший реально працюючий лазер на рубіні продемонстрував Т. Меймен (США) в 1960 р.

У лазері використовується взаємодія двох форм матерії: робочої речо-

вини лазера і електромагнітного випромінювання, яке відіграє роль збуджувача (індуктора) [17].

У газових лазерах видимого діапазону відповідно до рекомендації МБМВ як робоча речовина використовується суміш гелію і неону. Під дією електромагнітної енергії (так званого накачування) виникає індуковане (вимушене) випромінювання, тобто випромінюється квант енергії відповідно до вже відомої нам квантомеханічної формули.

Підкреслимо, що це той самий принцип, на якому працюють молекулярні і атомні квантові генератори, але в оптичному діапазоні – з деякими його особливостями.

Щоб створити умови для інтенсивного індукованого випромінювання, треба збільшити число квантів, що поглинаються в робочому тілі лазера. Це завдання виконує оптичний резонатор – два дзеркала, встановлені строго паралельно одне до одного. Світло перевідбивається в них велику кількість разів. Відстань між дзеркалами підбирається з великою точністю таким чином, щоб на довжині оптичного резонатора уклалося ціле число напівхвиль лазерного випромінювання. У цьому випадку поля перевідбитих хвиль складаються, результуюча напруженість поля збільшується в сотні разів, що й потрібно для індукованого випромінювання лазера. Одне з дзеркал робиться напівпрозорим і слугує вихідним вікном лазера (рис. 3.2).

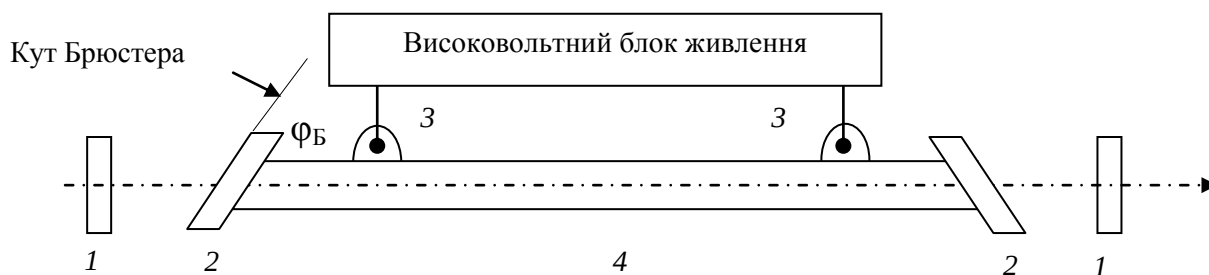


Рисунок 3.2 – Структурна схема газового лазера:
1 – дзеркала; 2 – вікна для виходу випромінювання;
3 – катод та анод; 4 – газорозрядна трубка

В окремому корпусі розташований високовольтний блок живлення, який створює на газорозрядній трубці лазера постійну напругу від 1 до 1,5 кВ.

У циліндричному корпусі розташована газорозрядна трубка з двома дзеркалами, що знаходяться біля її торців. Торці розрядної трубки закриті віконцями з оптичного скла. Вони нахилені до осі трубки під кутом Брюс-

тера ϕ_B . Цей кут залежить від показника заломлення скла η : $\text{tg } \phi_B = \eta$. Світло, багаторазово проходячи через скляну пластину, нахилену під кутом Брюстера, стає лінійно поляризованим.

При індукованому випромінюванні фотони, породжені зовнішнім полем, мають частоту, напрямок розповсюдження і поляризацію, однакові з полем, що їх викликало. Тому випромінювання лазера є когерентним, тобто хвилі, що випромінюються різними ділянками джерела, мають однакову частоту і постійний фазовий зсув. Тоді випромінювання окремих ділянок складаються і формується вузький промінь – на відміну від некогерентних (спонтанних) джерел світла. До останніх належить більшість освітлювальних приладів і ламп.

Особливою вимогою до гелій-неонового лазера, що використовується в еталоні довжини, є висока стабільність його частоти. Існують два методи підвищення стабільності: активний і пасивний. Пасивний метод полягає в оптимізації конструкції і умов експлуатації і не дозволяє досягнути необхідної для еталона стабільності.

Активний метод полягає у використанні дискримінатора і у автоматичному підстроюванні частоти на вершину його частотної характеристики за так званим «провалом Лемба». Як дискримінатор використовуються спектральні лінії атомів і молекул або опорні випромінювання більш стабільних лазерів.

Для одержання резонансів насиченого поглинання необхідно, щоб обраний як дискримінатор робочий перехід (спектральна лінія) попадав у діапазон перестройки газового лазера. He-Ne-лазер може генерувати хвилі 0,6328; 1,15 і 3,39 мкм (залежно від конструкції, матеріалу, типу переходу тощо).

На рис.3.3 подано всі оптичні частоти, стабілізовані за частотними реперами, що рекомендовані для використання як стандартні частоти в оптичному діапазоні (вторинного відтворення секунди). Окремо виділена група частот, яка рекомендована для реалізації метра.

Найбільшого поширення набули такі пари «лазер – поглинаюча чарунка»:

- He-Ne лазер з довжиною хвилі $\lambda=3,39$ мкм і метан CH_4 , (He-Ne/ CH_4);
- He-Ne лазер $\lambda=0,63$ мкм і іод I_2 (He-Ne/ I_2).

Стабілізовані лазери створили особливий клас метрологічних лазерів, які стали реперами частоти оптичного діапазону. Так, лазер He-Ne/ CH_4 має похибку відтворення частоти (від включення до включення) $(1 - 3) \cdot 10^{-13}$,

похибку відтворення частоти $(0,5-5) \cdot 10^{-13}$. Лазер He-Ne/J₂ має похибку відтворюваності – 10^{-11} , нестабільність 10^{-12} .

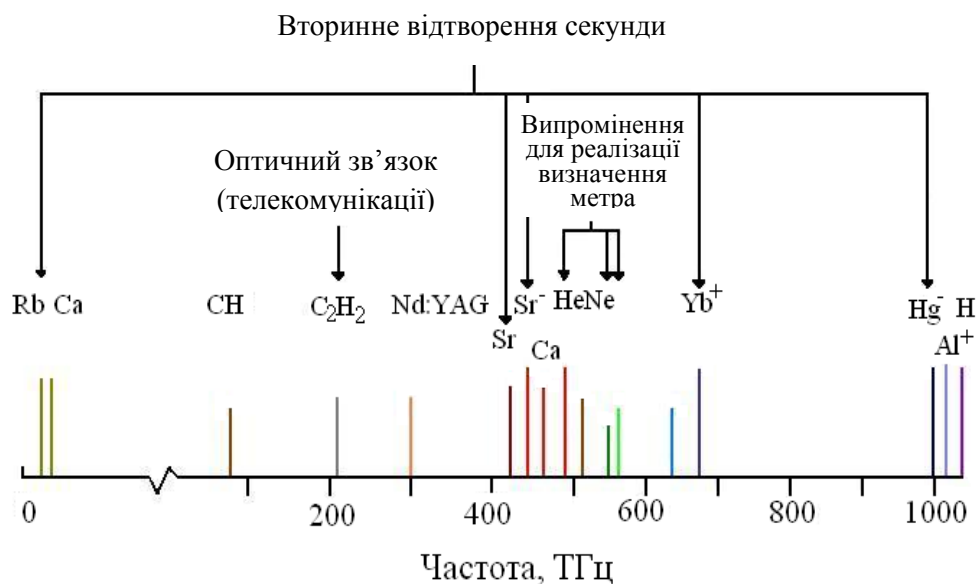


Рисунок 3.3 – Рекомендовані стандартні частоти оптичного діапазону

3.3.2. Система вимірювання частоти лазера

Другим важливим завданням при створенні «світлового еталона метра» є вимірювання абсолютного значення частоти стабілізованого лазера He-Ne/J₂ з необхідною точністю. Вона може бути вирішена такими методами:

- шляхом прив'язки частоти лазера до частоти первинного еталона, тобто цезієвого репера;
- взаємними звіреннями частот лазерів;
- використанням «частотної гребінки» лазерів надкоротких (фемтосекундних) імпульсів.

Перший шлях надзвичайно складний, оскільки частота лазера He-Ne/J₂ складає 473 ТГц, а вихідна частота первинного еталона часу – частоти $f_e = 5$ МГц. Кілька країн створили відповідний комплекс, який одержав назву «радіооптичного частотного моста» (РОЧМ). Задача РОЧМ – «підняти» еталонну частоту з радіодіапазону до діапазону лазерного випромінювання з подальшим вимірюванням різницевої частоти f_p за допомогою прецизійного електронно-лічильного частотоміра.

Основу РОЧМ складають помножувачі частоти, НВЧ-генератори, лазери субміліметрового і інфрачервоного діапазону, нелінійні елементи, схеми автопідстроювання частоти. Схему РОЧМ, створеного у *PTB* (Німеччина), який «прокладає міст» між цезієвим (радіодіапазон) і кальцієвим (оптичний

діапазон) стандартами частоти, наведено на рис. 3.4. Однак реалізація такої схеми і проведення відповідних вимірювань є дуже складним завданням у технічному і організаційному планах.

Деякі країни, зокрема Росія, пішли комбінованим шляхом – «підняли» еталонну частоту 5 МГц за допомогою РОЧМ до частоти He-Ne/CH₄ лазера (близько 88 ТГц), тобто виміряли частоту цього лазера. Цей лазер став базовою мірою частоти в ланцюзі «цезієвий репер – He-Ne/CH₄ лазер – He-Ne/J₂ лазер». Подальше вимірювання частоти лазера He-Ne/J₂ виконується за допомогою інтерференційного методу, шляхом порівняння довжини хвиль лазерів $\lambda_x/\lambda_{\text{CH}_4} = f_{\text{CH}_4}/f_x$. Дробова частина відношення вимірюється модуляційним методом.

Структурна схема цієї апаратури наведена на рис. 3.5. Очевидно, що наявність інтерферометра в ланцюзі вимірювання частоти лазера є джерелом додаткової похибки відтворення метра.

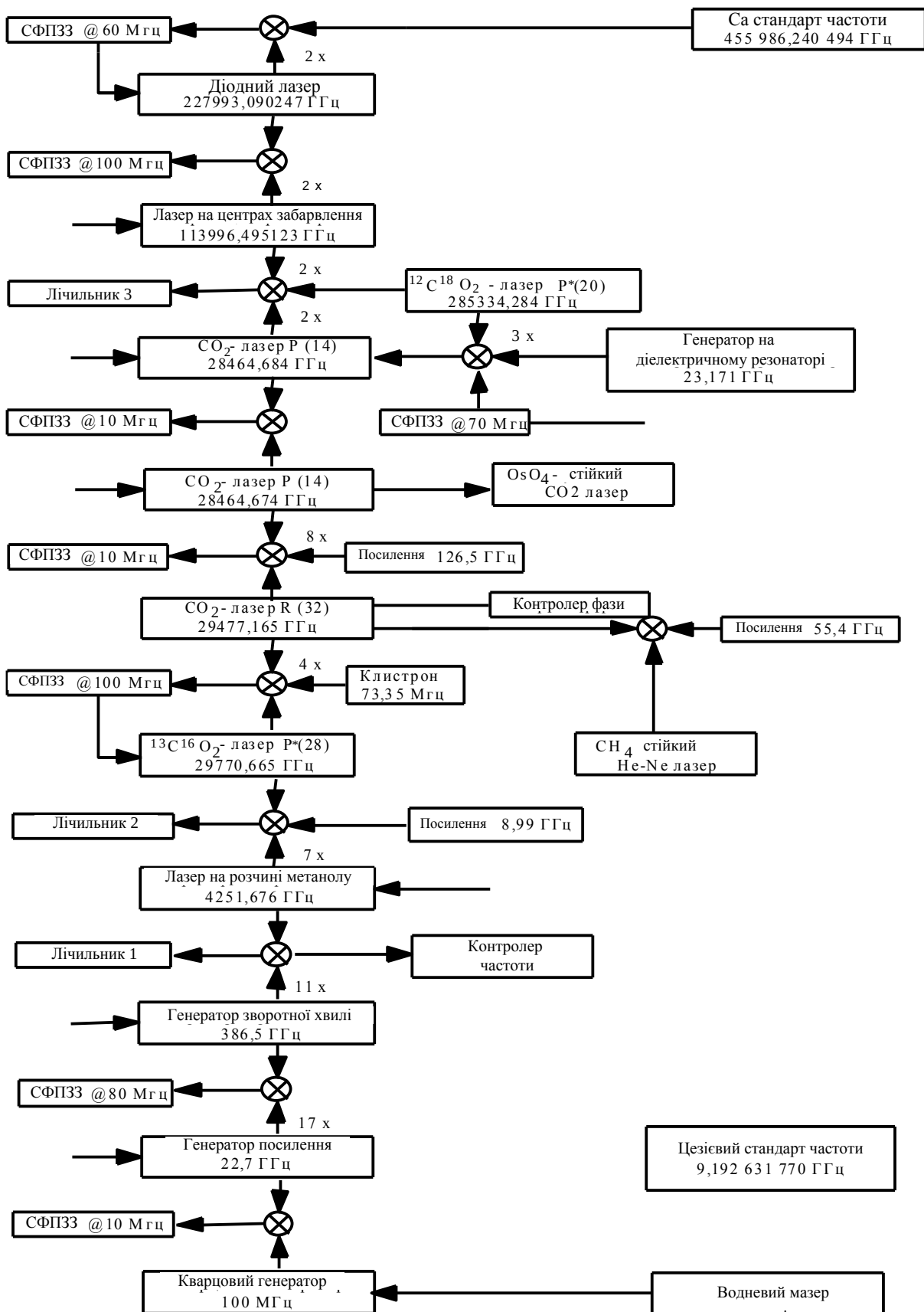
Другий метод – метод звірення частот лазерів – полягає у вимірюванні за спеціальною методикою різниці частот лазерів, якщо частота одного з них відома з необхідною точністю.

Для одержання різницевої частоти між двома оптичними частотами необхідно використати нелінійне фоточутливе середовище, яке реалізовано в сучасних лавинних фотодіодах.

Оскільки найбільше використання одержали He-Ne/ J₂ лазери з довжиною хвилі 633 нм, процедури звірень цих лазерів детально розроблені і використовуються в міжнародних звіреннях. При цьому в цих процедурах обов'язково приймають участь лазери, частоти яких періодично контролюються на РОЧМ МБМВ.

Процедура звірень здійснюється з використанням гетеродинної установки, яка дозволяє вимірювати різницю частот між двома близькими оптичними частотами. Особливістю звірення He-Ne/J₂ лазерів є необхідність приведення всіх вимірюваних величин до однакових умов. До цих умов належать внутрішньорезонаторна потужність випромінення лазера, температура кристалічного йоду в чарунці, тиск насиченої пари йоду, амплітуда девіації оптичної частоти тощо. Аналіз різницевих частот між оптичними частотами включає послідовну стабілізацію частот за піками поглинання різних груп (d, e, f, g) і обчислення середніх значень. Більш докладно ця методика викладена в [18].

Третій метод – з використанням частотної гребінки – докладно буде наведено нижче (при розгляді фемтосекундного лазера).



СФПЗ - Стабілізація фази по петлі зворотного зв'язку

Рисунок 3.4 – Схема РОЧМ, створеного в РТВ

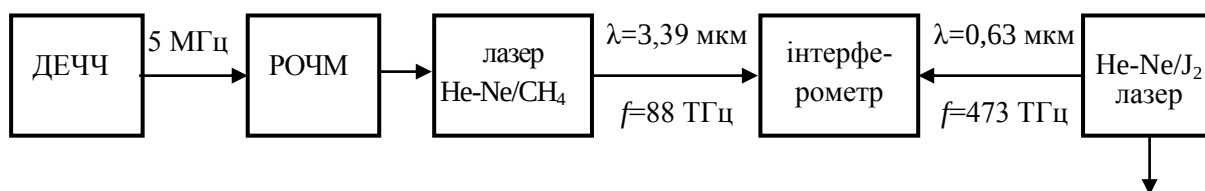


Рисунок 3.5 – Схема вимірювання частоти лазера He-Ne/J₂ з використанням РОЧМ і інтерферометричного методу

3.3.3. Система передачі розміру одиниці мірам довжини

Ще одне завдання – передавання розміру одиниці від лазера He-Ne/J₂ до штрихових і кінцевих мір довжини – здійснюється за допомогою того самого інтерференційного методу шляхом підрахунку числа $N+\delta$ півхвиль $\lambda/2$, що укладаються на вимірюваній довжині $L = \lambda/2(N+\delta)$, де δ – дробова частина порядку інтерференції (вимірюється модуляційним методом). Для здійснення цих вимірювань до складу еталона входить спеціальний інтерференційний компаратор (див. рис. 3.1).

Зазначимо, що для високоточних вимірювань довжини за допомогою інтерферометрів необхідно забезпечувати стабільні параметри навколишнього середовища, з високою точністю вимірювати температуру, вологість, урахувати показник заломлення атмосфери середовища і т. д. Усе це вимагає створення спеціальних термостатованих приміщень і досить складного додаткового устаткування. У первинних еталонах одиниці довжини уся відповідна апаратура, як правило, розміщується у спеціальній термобарокамері, а процеси вимірювання й обробки результатів здійснюються автоматично.

Як йшлося вище, прийняття нового визначення метра привело до прямого зв'язку одиниць часу (частоти) і довжини. Отже, у сукупності первинний еталон часу – частоти, система переносу частоти в оптичний діапазон – РОЧМ, система стабілізованих лазерів та інтерферометричний компаратор, що формує і передає розмір метра його матеріальним носіям – штриховим і кінцевим мірам, складають **єдиний еталон одиниць часу, частоти і довжини**. При цьому в основі цього еталона лежать дві фізичні сталі, швидкість світла у вакуумі і частота переходу атома цезію-133, числові значення яких прийняті за міжнародною згодою.

3.4. Первинний еталон одиниці довжини України

Первинний еталон складається з трьох комплексів: лазерного еталонного джерела світлової хвилі, апаратури передачі розміру одиниці мірам довжини (1), а також апаратури передачі іншим джерелам еталонного випромінювання (2). Структурна схема еталона наведена на рис. 3.6 [19].

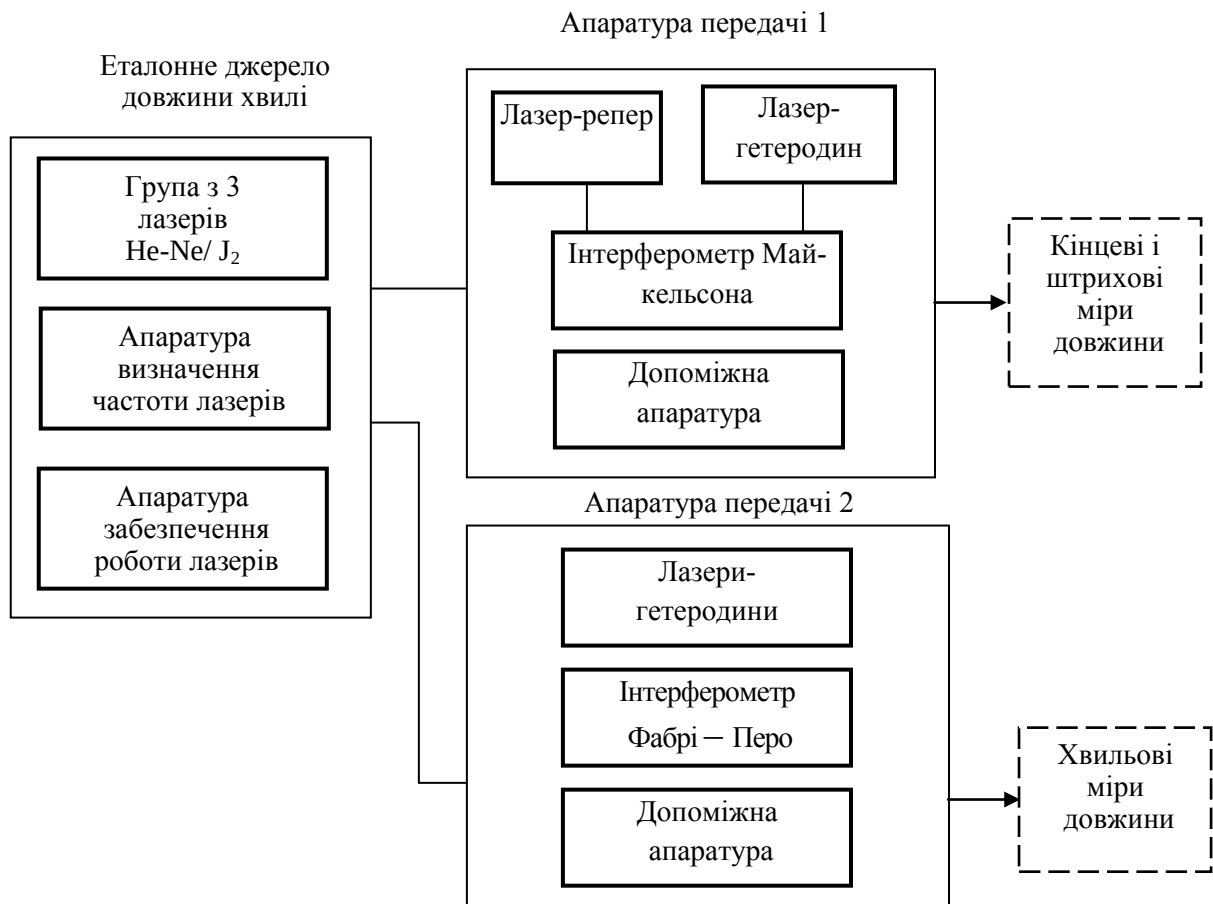


Рисунок 3.6 – Структурна схема первинного еталона одиниці довжини

Як джерело еталонної світлової хвилі використовуються три гелій-неонових лазери, стабілізовані за ефектом насиченого поглинання в йоді He-Ne/J₂ при довжині хвилі $\lambda=6,33$ нм, які в сукупності складають групову міру довжини. Така групова структура дозволяє підвищити метрологічні характеристики (знизити похибку відтворення одиниці довжини), а також метрологічну надійність джерела. У груповій мірі забезпечується порівняння джерел між собою, автоматичне підстроювання частоти (АПЧ), збір і обробка вимірювальної інформації. Абсолютне значення частоти групової міри визначається методом звірення частот лазерів.

В апаратурі передачі розміру одиниці 1 відбувається вимірювання (атестація) довжин штрихових і кінцевих мір за допомогою еталонних лазерів He-Ne/J₂. При цьому використовується еталонний лазер-репер і лазер-гетеродин, прив'язаний за частотою до лазера-репера. Вимірювальна частина складається з лазерного інтерферометра Майкельсона, фотоелектронних мікроскопів, необхідних для наведення на штрих штрихової міри. Міри, що атестуються, розташовані на спеціальних ложементях в одному з плечей інтерферометра Майкельсона на столі, що забезпечує їх точне переміщення.

Довжина в інтерферометричному компараторі вимірюється за формулою $L=(\lambda_e/2) \cdot N + \delta$. Дрібна частина порядку інтерференції вимірюється модуляційним методом автоматично. Має місце вітрозахист, контроль параметрів оточуючого середовища (вимірювання температури, тиску, вологості), визначення показника заломлення середовища, поправки до $t = 20^\circ\text{C}$. Стабільні умови забезпечуються завдяки термобарокамері, яка є складною автоматизованою системою.

Сумарна середньоквадратична похибка передачі одиниці складає: штрихової міри $S_e = 2,6 \cdot 10^{-9}$; кінцевої міри $S_e = 2,1 \cdot 10^{-9}$.

В апаратурі передачі 2 відбувається передача розміру одиниці іншим лазерам, криптоновим лампам і іншим еталонним джерелам випромінювання, що атестуються. Цей комплекс одержує одиницю довжини з використанням лазерної гетеродинної системи. Другою важливою частиною її є вакуумований термостатований інтерферометр Фабрі – Перо.

Наведемо метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці довжини України:

- діапазон вимірювань від 0 до 10 м;
- випадкова похибка (СКВ) $S = 2 \cdot 10^{-11}$;
- невиключена систематична похибка $\Theta = 2,5 \cdot 10^{-11}$.

Розширена невизначеність відтворення одиниці $U_p = 5 \cdot 10^{-11}$.

3.5. Перспектива удосконалення – фемтосекундний лазер

В останні роки розроблено титан-сапфірові лазери, що генерують послідовність ультракоротких (фемтосекундних) оптичних імпульсів, яку називали «частотною гребінкою». Спектр випромінювання такого лазера являє собою дискретний еквідистантний спектр-гребінку оптичних частот. Це дозволило вирішити цілий ряд важливих (фундаментальних) задач у метроло-

гії, а саме, виміряти абсолютні значення частот випромінювання стандартів частоти оптичного діапазону (на одиноких іонах, охолоджених атомах або молекулах) [18]. Оптичну схему фемтосекундного лазера подано на рис.3.7.

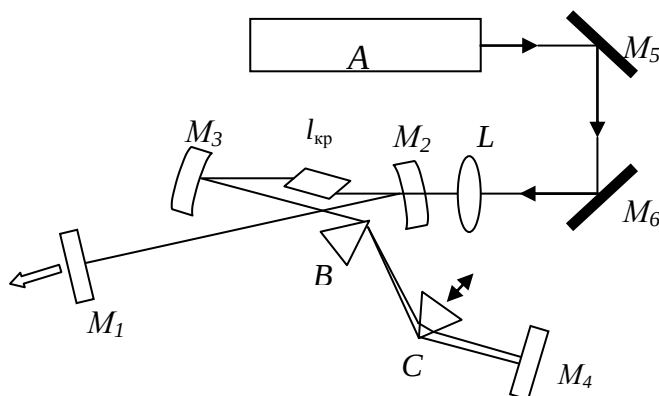


Рисунок 3.7 – Оптична схема фемтосекундного лазера

Тут M_1 і M_4 – вихідне і «глухе» дзеркала; M_2 і M_3 – сферичні дзеркала фокусуючого плеча резонатора, в якому знаходиться Ti-Sa кристал l_{kp} ; M_5 і M_6 – направляючі дзеркала Ag лазера накачки; L – лінза, що фокусує випромінювання накачки в Ti-Sa кристал; B і C – призми компенсатора дисперсії групової швидкості (ДГС).

Фемтосекундний лазер працює в режимі синхронізації мод, який забезпечується виконанням ряду умов. За рахунок нелінійних ефектів в активному середовищі лазера (ефект Керра) або за рахунок дії зовнішнього радіочастотного сигналу всі подовжні моди синхронізуються за часом. Завдяки цій синхронізації в резонаторі лазера формується і постійно випромінюється поодинокий оптичний імпульс. Частота повторення таких імпульсів f_R визначається довжиною резонатора і груповою швидкістю розповсюдження «несучої» хвилі. Інтервал поміж двома сусідніми модами або спектральними компонентами гребінки точно дорівнює частоті повторення імпульсів $f_R = V_g/2l$, де l – довжина резонатора, V_g – групова швидкість розповсюдження в резонаторі. Форма цих імпульсів визначається кількістю синхронізованих мод і ступенем їх синхронізації. Поміж подовженістю оптичного імпульсу τ_0 і шириною частотного дискретного спектра $\Delta\omega_0$ існує прямий зв'язок, що описується виразом

$$\tau_0 \Delta\omega_0 = K,$$

де $K \approx 1$ – коефіцієнт, що залежить від форми обвідної імпульсу і від рівня, за яким вимірюються τ_0 та $\Delta\omega_0$.

Однак досягнути ультракороткої фемтосекундної довжини імпульсів складно, тому використовується ще один фізичний ефект. При проходженні імпульсного випромінювання лазера через мікроструктуроване кварцове волокно реалізується ефект фазової самомодуляції, який веде до зменшення довжини імпульсів і до розширення спектра випромінювання. При високій стабільності частотно-часових характеристик імпульсного випромінювання можна одержати стабільну частотну гребінку шириною в октаву. Ця гребінка перекриває весь частотний діапазон і являє собою частотну шкалу, за допомогою якої можна проводити вимірювання будь-якої оптичної частоти, що знаходиться в її межах.

Оптичні імпульси з тривалістю τ_0 у часовій області мають вигляд, наведений на рис. 3.8. Спектр оптичних імпульсів подано на рис. 3.9.

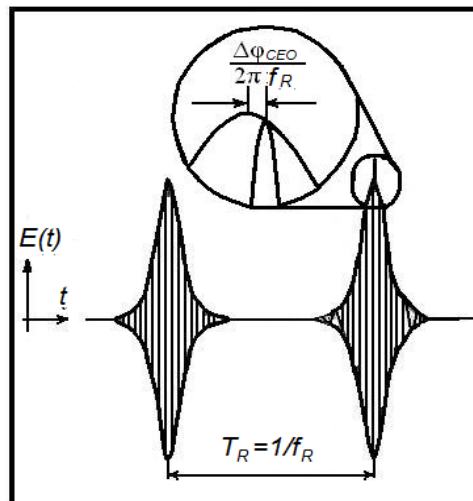


Рисунок 3.8 – Оптичні імпульси

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. Він визначається за зсувом максимуму обвідної імпульсу відносно максимуму несучої, і обумовлений різницею поміж груповою і фазовою швидкостями розповсюдження випромінювання в резонаторі лазера. Таким чином, $\Delta\phi$ можна стабілізувати за допомогою керування групової швидкості.

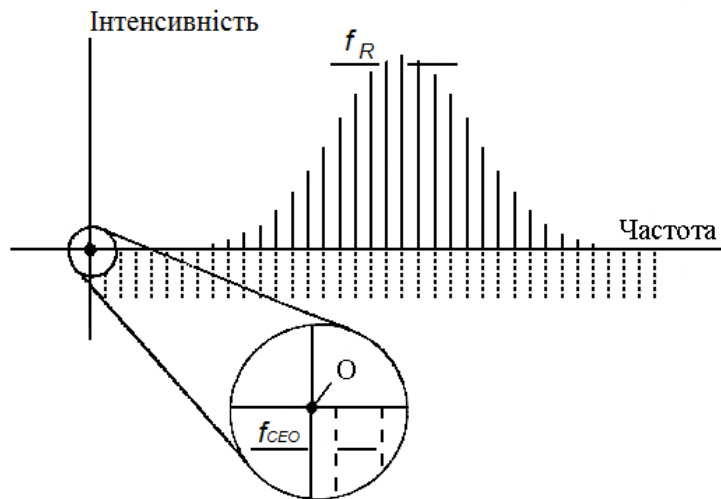


Рисунок 3.9 – Спектр оптичного імпульсу

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 V_g . 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 [18].

Для генерації оптичної гребінки, яка в спеціалізованій літературі одержала назву суперконтініума, використовується спеціальне оптоволокну типу фотонного кристалу. Схема генератора суперконтініуму подана на рис. 3.10.

Для практичної реалізації частотних вимірювань оптичних частот лазерних джерел, окрім джерела частотної гребінки, також необхідна система оптичних гетеродинів. Це дозволить звести вимірювання абсолютних частот лазерів до вимірювання різницевих частот биття між досліджуваним і еталонним лазерами з оптичним суперконтініумом, які знаходяться в радіочастотному діапазоні.

Спрощена структурна схема системи оптичного гетеродинування наведена на рис.3.11. Схема містить два однотипних оптичних канали: канал 1, призначений для реєстрації сигналу биття між частотою еталонного лазера і частотою однієї з спектральних компонент гребінчастої структури випромінювання фемтосекундного лазера; канал 2 – для реєстрації сигналу биття між

частотою лазера, яку необхідно виміряти, і найближчою до неї компоненти спектра випромінення фемтосекундного лазера.

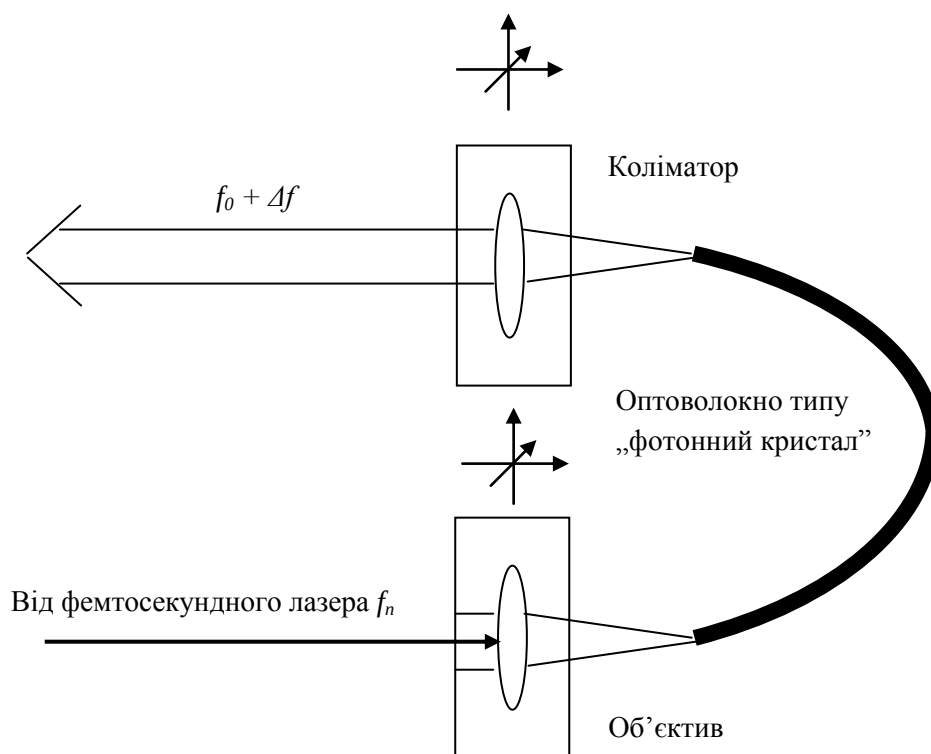


Рисунок 3.10 – Схема генератора суперконтініуму

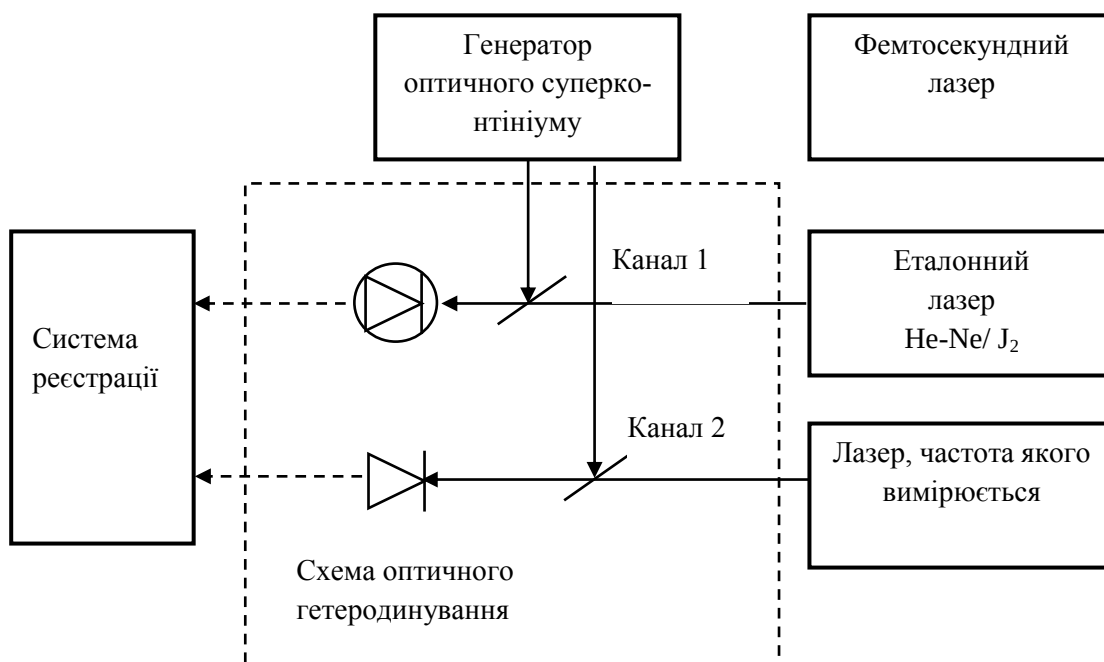


Рисунок 3.11 – Структурна схема системи оптичного гетеродинування

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. Він визначається за зсувом максимуму обвідної імпульсу відносно максимуму несучої, і обумовлений різницею поміж груповою і фазовою швидкостями розповсюдження випромінювання в резонаторі лазера. Таким чином $\Delta\phi$ можна стабілізувати за допомогою керування групової швидкості.

Прикладом лазерної системи, що забезпечує вирішення комплексу задач частотно-часових вимірювань в оптичному діапазоні є фемтосекундний лазерний комплекс Інституту фізики НАН України, що базується на титан-сапфіровому лазерному генераторі фірми Coherent (США) «Mira optima 900F». Використання частотної гребінки, яку генерує фемтосекундний лазер, дозволяє побудувати РОЧМ від цезієвого репера (5 МГц) до лазера He-Ne (473 ТГц). Це дає можливість у перспективі майже на порядок знизити похибку відтворення одиниці довжини і значно спростити процедуру її відтворення.

Крім того, цей комплекс дозволяє вирішувати цілий ряд дослідницьких задач з частотних вимірювань в оптичному діапазоні, які раніше були недоступні для метрологів.

Система з фемтосекундним лазером вже реалізована в МБМВ, а також у деяких провідних метрологічних інститутах світу.

Висновки

- За одиницю довжини в метричній системі (1799 р.) була прийнята одна мільйонна частина чверті паризького меридіана, що була матеріалізована у вигляді спочатку платинового, а пізніше – платино-іридієвого прототипу Х-подібного профілю. Цей прототип мав відносну похибку близько 10^{-7} і проіснував до 1960 р.

- З 1960 р. за еталон одиниці довжини була прийнята визначена кількість довжин хвиль випромінювання ізотопу криптону-86, а еталон був реалізований у вигляді спеціальної криптонової лампи. Це вже був квантовий еталон довжини, похибка якого складала близько $5 \cdot 10^{-9}$; подальше зниження похибки обмежувалось шириною лінії випромінювання і її асиметрією.

- Розробка оптичних квантових генераторів (лазерів), методів стабілізації і вимірювання їх частоти, а також успіхи у вимірюванні швидкості електромагнітного випромінювання (світла) створили принципово нові мо-

жливості для реалізації стандартів довжини. У 1983 р. було прийняте нове визначення метра як шляху, який проходить світло за $1/299292458$ частину секунди. Створення «світлового еталона» метра дозволило знизити невизначеність його відтворення приблизно до $1 \cdot 10^{-11}$.

- У 1985 р. з'явився термін «*єдиний еталон часу – частоти – довжини*», оскільки зв'язок лазера з еталоном частоти (за допомогою радіооптичного частотного моста) забезпечує відтворення цих одиниць в єдиному комплексі апаратури.

- Подальша перспектива підвищення точності відтворення одиниці довжини пов'язана з використанням так званого *фемтосекундного лазера* у складі РОЧМ, що дозволить знизити невизначеність і суттєво спростити процес вимірювання частоти світлового лазера – носія одиниці довжини. Оцінка показує, що невизначеність відтворення одиниці за рахунок цього заходу може бути знижена до 10^{-12} .

Контрольні питання

1. Що було покладено в основу розміру метра при введенні метричної системи у 1799 р.?
2. На якому фізичному принципі був побудований «*криптоновий метр*»?
3. Що обмежує точність відтворення одиниці довжини за допомогою криптонової лампи?
4. Що розуміється під терміном «*світловий метр*»?
5. Сформулюйте сучасне визначення метра в SI?
6. Яка ФФС покладена в основу «*світлового метра*»?
7. Що є джерелом світлового випромінювання у сучасному еталоні метра?
8. Чи можна використати як джерело світла звичайну лампу розжарювання?
9. Що таке *радіооптичний частотний міст*?
10. Які основні системи входять до структури сучасного первинного еталона метра?
11. Який метод використовується для передачі одиниці довжини від світлового метра до матеріальних мір («*штрихового*» і «*кінцевого метра*»)?
12. Обґрунтуйте можливість створення єдиного еталона часу – частоти – довжини.
13. Що таке *лазер*? Які особливості його випромінювання зробили його еталонним джерелом?
14. Що таке *фемтосекундний лазер*? Яку роль він виконує у схемі еталона одиниці довжини?

Розділ 4

ЕФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

4.1. 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, в електричних вимірюваннях на час становлення їх як окремого виду (початок XX 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 «механізації» – порівняння з механічними явищами і одиницями. Не поринаючи у глибоку історію метрології в електриці, нагадаємо, що 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 у 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.

У 1946 р. МКМВ рекомендував такі визначення одиниць до міжнародного застосування:

ампер – сила незмінного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини з нехтовно малою площею кругового поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликав би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ ньютону;

вольт – напруга на кінцях провідника, при якій струм в 1 ампер створює потужність в 1 ват;

ом – опір провідника, при якому напруга на кінцях провідника в 1 вольт створює струм в 1 ампер.

В 1960 р. ці визначення увійшли в нову систему SI, прийняту на 11-й ГКМВ, і діють по цей час.

Одиниці, що відтворюються згідно з цими визначеннями, пропонувалося називати абсолютними. Дані визначення були ідеальні з точки зору узгодження одиниць і абсолютних вимірювань у наукових експериментах, але вкрай незручні для практичного застосування. Наприклад, відтворення абсолютного ампера проводилися дуже рідко, тому що були досить складні і дорогі.

На практиці способи відтворення одиниць електричних величин SI ніколи не відповідали повною мірою їх визначенням. Строго кажучи, визначення ампера 1946 р. не мало на увазі проведення експериментів, а було лише основою для розрахунку значень струмів через взаємодію реальних провідників, оскільки система з двох нескінченних паралельних провідників нульового діаметра ідеальна і на практиці неможлива. У реальних умовах довжина проводів завжди скінченна, як і їх товщина. Крім того, для підвищення точності вимірювань сили взаємодії проводів цю силу необхідно зробити досить великою. Тому зазвичай вимірюється сила взаємодії не між парою проводів, а між двома котушками з великою кількістю витків дроту. Кінцеві розміри і ненульова товщина проводів котушок роблять необхідним розрахунок пов'язаних з цими відмінностями магнітних полів, і результат залежить не тільки від відстані між котушками, але і від їх розмірів, форми, товщини, неоднорідності проводів тощо. У всіх експериментах, у яких розмір ампера відтворюється за силою взаємодії котушок із струмом, саме неточність визначення геометричних параметрів дає найбільший внесок у результуючу невизначеність. Вона склала кілька одиниць на 10^{-5} і залежала від точності виготовлення котушок і визначення відстані між ними. Незважаючи на суттєвий прогрес у досягненні точності в наступних експериментах, обмеження на їх невизначеність, що накладається технологічними можливостями виготовлення котушок з розрахунковою формою, залишалося головним. В експерименті з «струмовими вагами» 1958 р. невизначеність була знижена до $5 \cdot 10^{-6}$, що, мабуть, близько до межі можливостей методу [20].

До 1989 р. не було запропоновано жодного досить точного способу порівняння електричної і механічної потужностей. Тому необхідний для побудови системи електричних величин другої одиниці традиційно використовувався ом. Перший експеримент з відтворення ома в одиницях SI відбувся в 1936 р.: електричний опір порівнювався з імпедансом розрахункової

котушки індуктивності. Як і при відтворенні ампера, для розрахунку індуктивності були потрібні точні вимірювання геометричних параметрів котушки, і їх неточність була основною складовою невизначеності відтворення ома. Іншими недоліками такого методу були дорожнеча і громіздкість використовуваних котушок, що було обумовлено необхідністю досягнення досить великого значення індуктивності без використання феромагнітних осердів, які значно збільшують невизначеність результатів вимірювань.

Додамо, що і одиниці магнітних величин, зокрема, магнітної індукції, визначались через струм і розрахункову котушку – з усіма недоліками цього методу.

У 1956 р. був винайдений більш точний метод відтворення ома за допомогою так званого *розрахункового конденсатора* на основі теореми Томсона–Лампарда, у якого невизначеність ємності була меншою, ніж невизначеність розрахункової індуктивності котушки, тому що результати розрахунків істотно менше залежали від геометричних розмірів і форми пристрою [21,22]. Але й створення розрахункового конденсатора не поліпшило суттєво ситуацію в електричних вимірюваннях.

Ставилися також експерименти щодо відтворення вольт за вимірюваннями електростатичної сили між двома зарядженими тілами в ньютонах (вольт-ваги), але й ці експерименти виявилися досить складними, дорогими і забирали багато часу. Щоб забезпечити потреби практичної метрології, національним лабораторіям було рекомендовано зберігати розміри вольт і ома у вигляді артефактів, тобто у вигляді наборів мір відповідних величин. Вольт зберігався у вигляді середнього значення напруги групи так званих *нормальних елементів* – хімічних джерел ЕРС, а ом – групою котушок, виготовлених з металевих сплавів зі стабільним у часі і слабо залежного від температури опором. Групи мір напруги та опору служили і практичними національними еталонами. Для підтримки міжнародної єдності вимірювань доводилося регулярно проводити міжнародні звірення.

З підвищенням точності вимірювань потенційні можливості засобів вимірювань електричних величин все більше вступали у протиріччя з точністю, з якою були відомі розміри самих цих одиниць. Визначення одиниць, розроблені ще перед II світовою війною, виявилися не у змозі забезпечити необхідну точність відтворення не тільки основної одиниці системи SI ампера, але і вата, і вже тим більше інших електричних одиниць.

Криза, яка виникла, була частково розв'язана прийняттям МКМВ рішення про побудову практичної системи одиниць електричних величин на основі рекомендованих реперних значень електричних опору та напруги, відтворених за допомогою макроскопічних квантових ефектів. Це були вже відомі на той час *ефект Джозефсона і квантовий ефект Холла*.

У 1988 р. МКМВ затвердив значення сталих Джозефсона і Клітцинга і рекомендував, починаючи з 1 січня 1990 р., для практичного використання відтворювати вольт на основі ефекту Джозефсона, вважаючи константу Джозефсона $K_J = K_{J-90} = 483597,9 \text{ ГГц} / \text{В}$, а ом – на основі квантового ефекту Холла, вважаючи константу Клітцинга $R_K = R_{K-90} = 25\,812,807 \text{ Ом}$. Це було дуже важливе рішення, яке суттєво змінило ситуацію в електричних вимірюваннях. Фактично виникла нова система одиниць в електриці – практична.

Розглянемо ці ефекти докладніше.

4.2. Фізичні основи ефекту Джозефсона

Ефект Джозефсона ґрунтується на таких квантових фізичних явищах як надпровідність, тунелювання електронів і об'єднання їх у так звані куперівські пари. Всі ці ефекти були розглянуті у розділі 1.

Нагадаємо, що стан електронних пар у надпровіднику характеризується єдиною хвильовою функцією. Якщо два надпровідники S_1 і S_2 , кожен з яких має свою хвильову функцію ψ_1 і ψ_2 , починають наблизатись один до одного, на якійсь відстані (а саме, коли вона стає менша від розміру куперівської пари) хвильові функції починають «відчувати» одна одну, і коли вони перекриваються, відбувається тунелювання куперівських пар, а між надпровідниками S_1 і S_2 виникає струм надпровідності (рис. 4.1). Це явище, відкрите Б. Джозефсоном [5], одержало назву «стаціонарного ефекту Джозефсона», а контакт двох надпровідників, через який тунелюють куперівські пари – «тунельного контакту» або «контакту Джозефсона».

Коли Б. Джозефсон опублікував свою роботу (1962 р.), фізики згадали (Гьєвер), що вони спостерігали у своїх експериментах якісь незрозумілі струми у контактах двох зразків, розділених тонким шаром діелектрика, і приписали їх «закорочуванням» між зразками. Більш того, вони зробили все можливе, щоб усунути ці небажані струми, які псували їм всю картину спостережень.

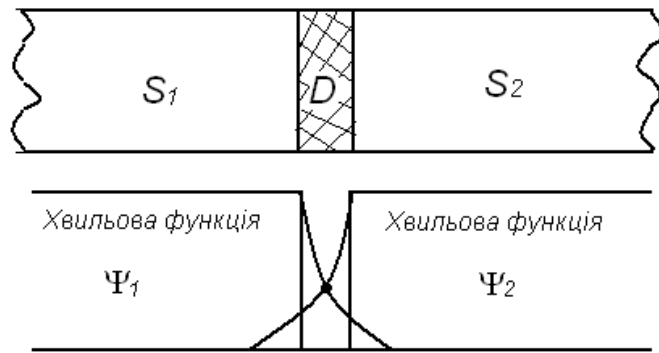


Рисунок 4.1 – Тунелювання електронів у контакті
«надпровідник – діелектрик – надпровідник»

Повертаючись до відкриття Джозефсона, відзначимо, що одночасно зі стаціонарним ефектом він передбачив також нестаціонарний ефект, а саме, виникнення електромагнітного випромінювання на контакті при підвищенні струму через контакт, більший від деякого критичного.

Проілюструємо відкриття Джозефсона на такому прикладі (рис. 4.2).

Якщо постійну напругу E прикласти до надпровідника S , у колі потече електричний струм I , а падіння напруги на надпровіднику буде дорівнювати нулю (рис. 4.2, а).

Якщо тепер надпровідник розділити на 2 частини з великою відстанню між ними, то струм текти не буде, а вольтметр покаже напругу джерела (рис. 4.2, б).

При зменшенні відстані між двома надпровідниками до деякого значення (порядку одиниць нм) має місце перехід електронів з одного надпровідника в інший (тунелювання куперівських пар електронів), тобто в колі потече струм, хоча падіння напруги між надпровідниками не буде (рис. 4.2, в). Це є стаціонарний ефект Джозефсона. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) контакту при стаціонарному ефекті наведена на рис. 4.3.

При збільшенні струму до значення, більшого від деякого критичного, надлишок енергії випромінюється у вигляді кванта з енергією $2eU$, тобто контакт починає генерувати ВЧ-напругу (рис. 4.2, г), а це означає, що має місце нестаціонарний ефект Джозефсона.

Тут доцільно провести аналогію з електроном в атомі, який, переходячи з більш високого на більш низький вільний рівень енергії, випромінює при цьому квант електромагнітної енергії. Частоту цих квантів можна підрахувати за квантомеханічною формулою $\Delta E = hf_0$.

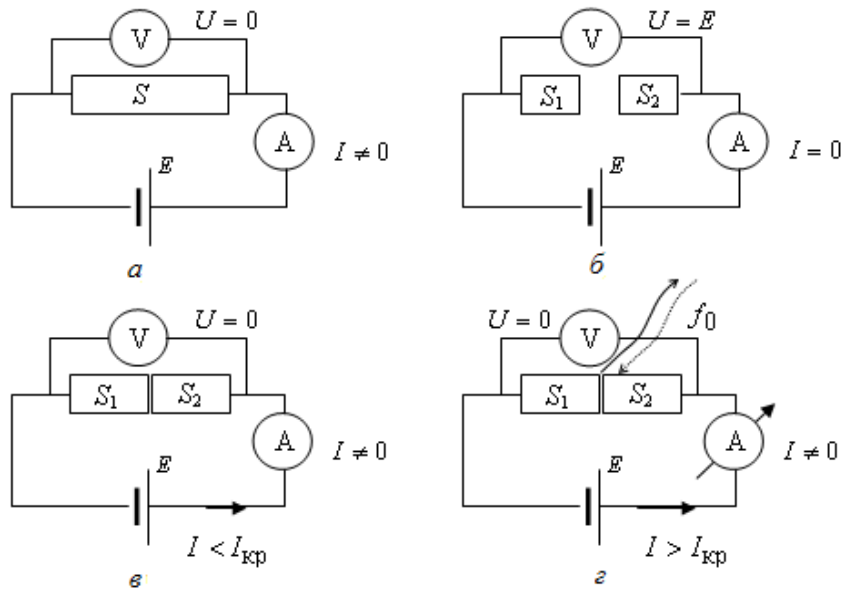


Рисунок 4.2 – До пояснення фізичної суті ефекту Джозефсона

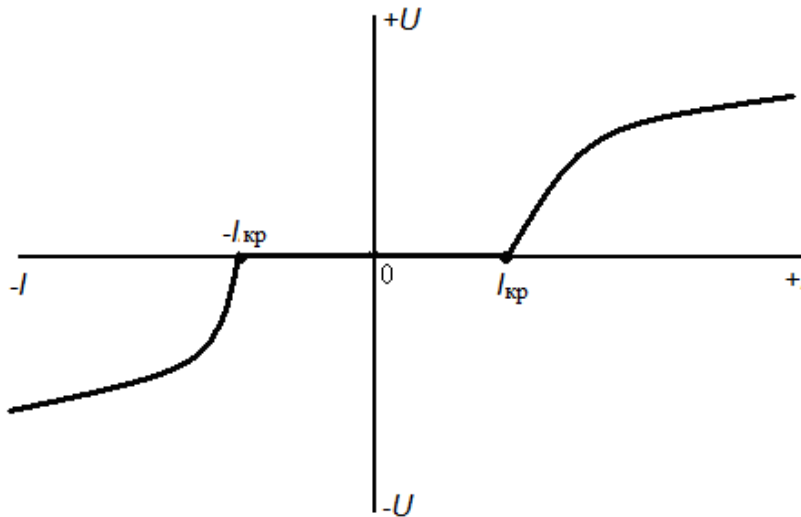


Рисунок 4.3 – ВАХ тунельного контакту при стаціонарному ефекті Джозефсона

Оскільки куперівська пара при напрузі U на тунельному контакті набула енергію $2eU$, то частота квантів становить $f_0 = \frac{2e}{h}U$. Відношення $\frac{2e}{h}$ приблизно дорівнює 500 МГц/мкВ. Тому на мові високочастотної техніки можна говорити про аналогію з електромагнітним ВЧ-резонатором.

Першу перевірку достовірності цього ефекту виконав американський фізик С. Шапіро у 1963 р. методом, запропонованим самим Джозефсоном. Якщо тунельний контакт дійсно працює як високочастотний резонатор, то, діючи на нього зовнішнім ВЧ-коливанням, можна модулювати випромінювання контакту (як це робиться в радіопередавачах) [23].

Якщо частота власного випромінювання контакту дорівнює ω_0 , а частота зовнішнього (модулюючого) опромінення ω , то при взаємодії обох випромінювань виникає частотно-модульований (ЧМ) сигнал, який має цілий спектр частот: $\omega_0 \pm \omega$, $\omega_0 \pm 2\omega$, $\omega_0 \pm 3\omega$ і т. ін. Струм цього ЧМ-сигналу описується відомим виразом через ряд функцій Бесселя першого роду n -го порядку J_n :

$$i(t) = I_m \sin \frac{2e}{\hbar} (U_0 t + \frac{U_m}{\omega} \cos \omega t + \varphi_0) = I_m \sum_{-\infty}^{+\infty} J_n \left(\frac{2e U_m}{\hbar \omega} \right) \cdot \sin \left\{ \left(n\omega + \frac{2e}{\hbar} U_0 \right) t + \varphi_0 \right\},$$

де $\hbar = \frac{h}{2\pi}$; $\frac{2e}{\hbar} U_0 = \omega_0$ – частота, яку випромінює контакт;

ω – частота зовнішнього опромінення.

Якщо для якоїсь частоти у спектрі виконується умова $\omega_0 = n\omega$, то це буде відповідати $\omega_0 - n\omega = 0$, тобто нульовій частоті.

Іншими словами, якщо на контакт направити випромінювання з частотою ω і плавно регулювати частоту ω_0 (змінюючи напругу на контакті), то при певних значеннях напруги на контактах повинен з'явитись постійний струм:

$$i_{\pm} = (-1)^n I_m J_n \left(\frac{n U_m}{U_0} \right) \sin \varphi_0.$$

Наслідком цього є поява на ВАХ джозефсонівського контакту особливостей у вигляді сходинок, які одержали назву «сходинок Шапіро». Це явище називають також квантуванням ВАХ (рис. 4.4). Не важко побачити, що висота (за напругою) кожної сходинок становить $U_J = \frac{h}{2e} f$, а напруга на

n -ій сходиці дорівнює $U_{nJ} = n \frac{h}{2e} f$. Відношення $\frac{h}{2e}$ одержало назву кванта магнітного потоку, а обернене відношення $-\frac{2e}{h}$ – сталої Джозефсона K_J .

Важливість квантового ефекту Джозефсона для метрології була швидко усвідомлена. Вже у 1966 р. У. Паркер, Б. Тейлор та Д. Лангенберг [24] використовували його для вимірювання відношення $2e/h$. Наступні, більш точні вимірювання тих самих авторів (з невизначеністю менше 10^{-6}), а пізніше і їх книга, присвячена новому погодженню ряду фундаментальних констант, виявилися не тільки суттєвими для метрології та фізики надпровідності, але і дозволили поліпшити загальну ситуацію у квантовій електродинаміці. Зокрема, завдяки уточненню значення $2e/h$ було усунено ряд су-

перечностей у теоретичних розрахунках «зсуву Лемба» для водню і дейтерію тощо.

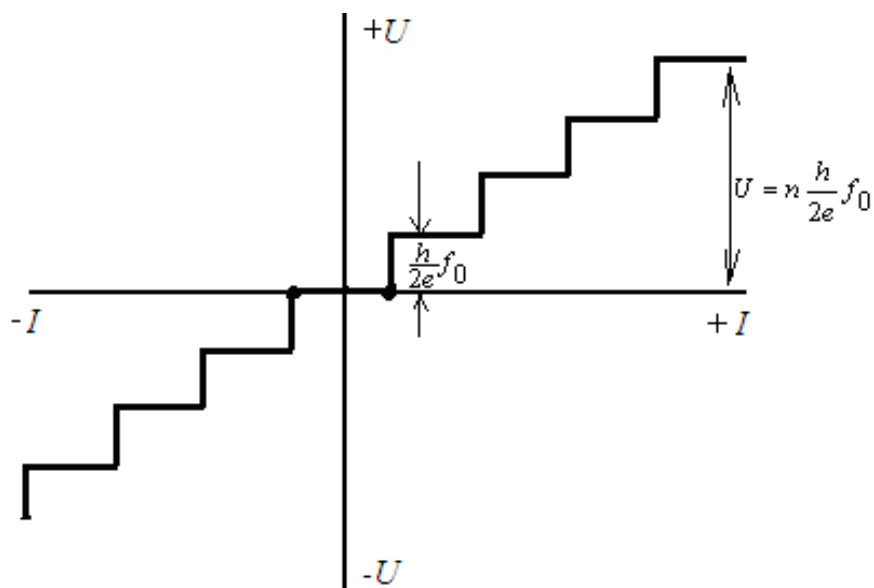


Рисунок 4.4 – ВАХ тунельного контакту при нестаціонарному ефекті Джозефсона

Слід зазначити, що фундаментальний характер співвідношення «напруга – частота» і рівняння Джозефсона ставились під сумнів протягом ряду років, не зважаючи на те, що й теоретичні аргументи, і експериментальні результати довели точність виконання співвідношення та його незалежність від зовнішніх умов експерименту (температури, типу контактів, матеріалів). У найбільш точних вимірюваннях різниця напруг на двох контактах різного типу, виготовлених з різних матеріалів, але опромінюваних НВЧ-коливанням від одного генератора, не була виявлена у границях $2 \cdot 10^{-16}$.

У 1972 р. Консультативний комітет з електрики МКМВ запропонував використовувати ефект Джозефсона для контролю стабільності групових еталонів вольт, які в той час будувались на насичених нормальних елементах (елементах Вестона). Рекомендоване значення $2e/h$ при цьому складало 483594,0 ГГц/В. Поступове накопичення більш точних даних про значення фундаментальних констант, відкриття квантового ефекту Холла та уточнення значення сталої тонкої структури дозволили у 1988 р. прийняти нову міжнародну угоду про відтворення вольт за допомогою ефекту Джозефсона. За рекомендацією МККВ, з 1990 р. було введено нове уточнене значення сталої Джозефсона $K_J = 2e/h = 483597,9$ ГГц/В. Численні експерименти пі-

дтвердили обґрунтованість цього уточнення. Значення K_{J-90} , встановлене у 1990 р., використовується повсюдно і на цей час.

Таким чином, метрологія одержала потужний метод для відтворення напруги постійного струму через частоту і ФФС. Оскільки частота опромінення може бути зроблена достатньо стабільною і може вимірятися з необхідною точністю, а значення ФФС прийняті єдиними для всього світу, в принциповому плані метод Джозефсона відкриває можливість суттєвого підвищення точності відтворення напруги, децентралізації і спрощення системи забезпечення єдності вимірювання. Але апаратура для реалізації цього методу пройшла ще значну еволюцію, перш ніж вона досягла сьогоденних характеристик, зробила прорив в електричних вимірюваннях і стала доступною широким колам практичних метрологів.

4.3. Апаратура для відтворення напруги постійного струму на основі ефекту Джозефсона

У спрощеному вигляді структурна схема апаратури для відтворення ефекту Джозефсона і передачі його розміру мірам ЕРС на нормальних елементах або твердотільних мірах наведена на рис. 4.5. До її складу входять такі основні системи:

- *Кріогенна система*, яка включає в себе контакти Джозефсона (КД), що монтуються на спеціальній платі кріогенного зонда, за допомогою якого плата з КД занурюється у кріогенне середовище (рідкий гелій). Крім того, зонд містить хвилевід, за допомогою якого на плату з КД подається НВЧ-опромінення. Кріогенне середовище створюється в спеціальній посудині великої ємності (40–80 л), яка одержала назву посудини Дьюара. Система включає також провідники, за допомогою яких підводиться напруга зміщення до КД та відводиться створена джозефсонівська напруга.

- *Джерело НВЧ опромінювання*, яке містить НВЧ-генератор необхідної частоти і потужності, систему автоматичного підстроювання частоти, джерелом опорного сигналу для якої служить еталон частоти, а також прецизійний вимірювач частоти опромінення f .

- *Блок керування*, який складається з джерела напруги зміщення U_0 для КД, а також з приладу візуального контролю ВАХ (осцилографічного характеріографа).

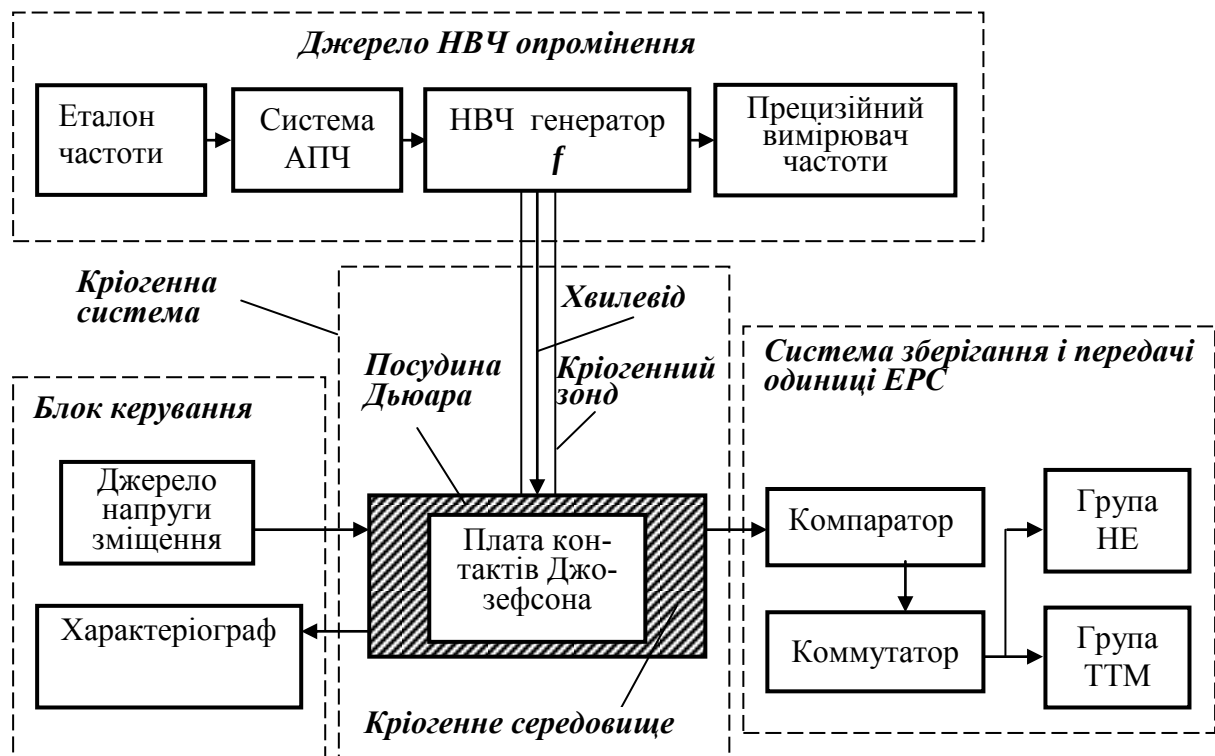


Рисунок 4.5 – Апаратура для відтворення напруги на основі ефекту Джозефсона

- *Вимірювальна система*, що складається з компаратора напруг джерела U_J і мір напруги, яким передається розмір «джозефсонівського вольт», а також комутуючого пристрою.

- *Система зберігання і передачі одиниці ЕРС*, яка складається з компаратора напруг джерела U_J і мір напруги, яким передається розмір «джозефсонівського вольт» (нормальні елементи та твердотільні міри ЕРС). До складу цієї системи входить також спеціальний комутатор.

На основі ефекту Джозефсона створено еталони одиниці постійної напруги – вольт – в багатьох промислово розвинених країнах. Розглянемо еволюцію цієї апаратури від перших зразків до наших днів. До складу перших еталонів входили кілька джозефсонівських контактів, які збуджувалися НВЧ-випромінюванням частотою 8–10 ГГц. Значення джозефсонівської напруги становило при цьому 4–10 мВ. Оскільки за допомогою цієї напруги необхідно було калібрувати міри напруги (наприклад, нормальні елементи) з ЕРС близько 1В, таке низьке значення відтвореної джозефсонівської напруги змушувало включати до складу еталона (компаратора) масштабні перетворювачі напруги різної конструкції (подільники) для зв'язку з цими мірами. Це призводило до значної втрати точності. Однак надалі були створені інтегральні схеми (матриці), що включали до себе кілька тисяч послідовно

з'єднаних контактів Джозефсона. Такі матриці дозволяють відтворювати безпосередньо напругу в 1 В і більше при частоті $f \sim 70$ ГГц.

У РТВ (Німеччина) для відтворення напруги 1 В були створені ланцюги з двома-трьома тисячами КД, а потім у ланцюгах з кількістю КД до чотирнадцяти–двадцяти тисяч вдалося впевнено відтворювати і напруги до 10 В. Наприклад, ланцюги, виготовлені в РТВ для відтворення напруги до 10 В, містять 13924 контактів Nb-Al₂O₃-Nb, розділених на 4 паралельні гілки по 3481 контактів у кожній, для того, щоб зменшити затухання НВЧ-випромінювання в довгому ланцюжку контактів. Антена типу «риб'ячий хвіст» (fin-line) забезпечує зв'язок НВЧ-хвилі (70 ГГц) у мікросмуговій лінії контактів зі стандартною лінією передачі – прямокутним хвилеводом. Кожен контакт працює на четвертій або п'ятій сходинці з восьми можливих. Повна вихідна напруга ланцюжка складає 10 В, відстань між сходинками 145 мкВ при частоті 70 ГГц [25, 26].

Створення матриць було великим технологічним проривом, який забезпечив широке впровадження ефекту Джозефсона в метрологічну практику. Додамо, що роботи з удосконалення джозефсонівських матриць продовжуються. На сьогодні вже створено матриці типу SNS (надпровідник – нормальний метал – надпровідник), а також SINIS (надпровідник – ізолятор – нормальний метал – ізолятор – надпровідник), які дозволили одержати напругу вище 10 В при надійній роботі. Технологія виготовлення таких інтегральних схем дуже складна, нею володіють лише деякі країни (особливо це стосується 10-вольтових матриць). Зовнішній вигляд матриці наведено на рис. 4.6.

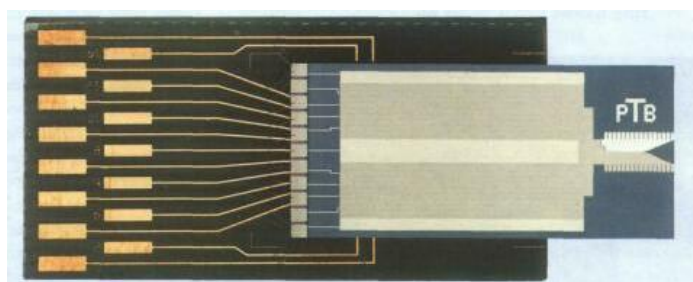


Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд матриці Джозефсона (РТВ), розмір 17×10 мм

Еволюція елементів Джозефсона привела до суттєвого удосконалення і інших систем еталонів, а також їх метрологічних, технічних та експлуатаційних характеристик. Однак підвищення частоти опромінення з 10 до

70 ГГц значно ускладнило відповідні генератори, систему стабілізації і точного вимірювання їх частоти.

Були розроблені спеціальні високочутливі нановольтметри для вимірювання різниці між напругою, що створюється матрицями КД, і мірами ЕРС, а також спеціальні комутатори. Крім джерела джозефсонівської напруги, еталон має містити в собі також згадану вище систему зберігання одиниці і її передачі. Ця система складається з мір ЕРС і компараторів. Як міри ЕРС використовуються насичені нормальні елементи (ННЕ) (група від 10 до 20 штук у спеціальному термостаті), хоча останнім часом еталон віддається твердотільним мірам (ТТМ) ЕРС на прецизійних стабілітронах (діодах Зенера). Багато країн мають у складі своїх національних еталонів міри ЕРС обох видів. Таким чином, у сучасному еталоні ЕРС на ефекті Джозефсона джерело джозефсонівської напруги слід розглядати як калібратор мір – зберігачів одиниці ЕРС, що включається 1–2 рази на рік під час атестації еталона, а вся практична робота зі збереження і передачі розміру одиниці ведеться з мірами.

Відзначимо також, що у структуру еталона входять дуже важливі додаткові пристрої і системи, що істотно впливають на його метрологічні характеристики: фільтри електричних і магнітних завад у складі кріозонда, система екранування приміщення від зовнішніх електромагнітних завад, системи термостатування, заземлення, гідроізоляції, високоякісного енергопостачання.

4.4. Первинний еталон України

До складу первинного еталона України входять багатoelementні матриці джозефсонівських контактів на 1 і 10 В, стабілізоване джерело НВЧ-випромінювання в діапазоні 70–90 ГГц, система зберігання одиниці на основі групової міри ННЕ і ТТМ, компаратори сталої напруги, електронно-обчислювальна машина (ЕОМ). Структурна схема державного еталона України наведена на рис. 4.7 [27].

4.4.1. Структурна схема еталона

Розглянемо особливості побудови найбільш відповідальних пристроїв.

Як йшлося вище, в еталоні використовується матриця німецького виробництва. Одновольтова матриця має 8192 контакти типу SINIS (надпровідник –

ізолятор – нормальний метал – ізолятор – надпровідник), в яких застосовано такі матеріали: Nb Al/Al₂O₃ /Al/Al₂O₃/Al-Nb.

Створення SINIS-матриці – одне з останніх досягнень у галузі технологій КД. Ці матриці дозволяють одержати потрібний ефект у широкому частотному діапазоні – від 10 до 100 ГГц, а головне, потребують значно меншої потужності НВЧ-опромінення, ніж SIS- і SNS-матриці. Крім того, на відміну від SIS-матриці, вона не має гістерезису ВАХ, а при заданому струмі зміщення має місце лише одна сходи́нка напруги, що робить еталонну напругу однозначною [28].

До кріогенних пристроїв відносять кріостат з рідким гелієм і кріогенний зонд. Кріогенний зонд призначений для кріплення на ньому матриці КД і занурення її в гелієве середовище, подавання на матрицю НВЧ-опромінення і постійного струму зміщення, а також відведення еталонної джозефсонівської напруги, одержаної на матриці.

Кріогенний зонд являє собою металеву конструкцію, розміщену вертикально, у верхній частині якої знаходиться хвилевідний перехід від прямокутного фланця (виходу НВЧ-генератора) до круглого перерізу хвилеводу, на нижньому кінці якого у спеціальному магнітному екрані кріпиться матриця КД. НВЧ-опромінення підводиться до матриці хвилевідним трактом через симетричну смужкову лінію, тракт має хвильовий опір 50 Ом. На підкладці з КД розташована перша ланка фільтра НВЧ. Фільтрація забезпечується індуктивністю і ємністю провідників, конденсаторами, а також РС-фільтрами, що входять до конструкції зонда.

Блок керування (характеріограф) складається із диференціального підсилювача і осцилографа (див. структурну схему еталона на рис. 4.7), призначених для візуального спостереження вольт-амперної характеристики КД, а також для живлення матриці постійним струмом зміщення. З його допомогою встановлюється оптимальний режим роботи матриці шляхом регулювання потужності НВЧ-генератора і напруги зміщення.

До складу характеріографа входить модуль джерела напруги для живлення матриці напругою зміщення, а також модуль джерела струму, який використовується для горизонтальної розгортки осцилографа. Розгортка може проводитися у ручному та автоматичному режимах. В автоматичному режимі застосовується генератор пилоподібної напруги розгортки з частотою, що плавно регулюється в діапазоні від 1 до 100 Гц.

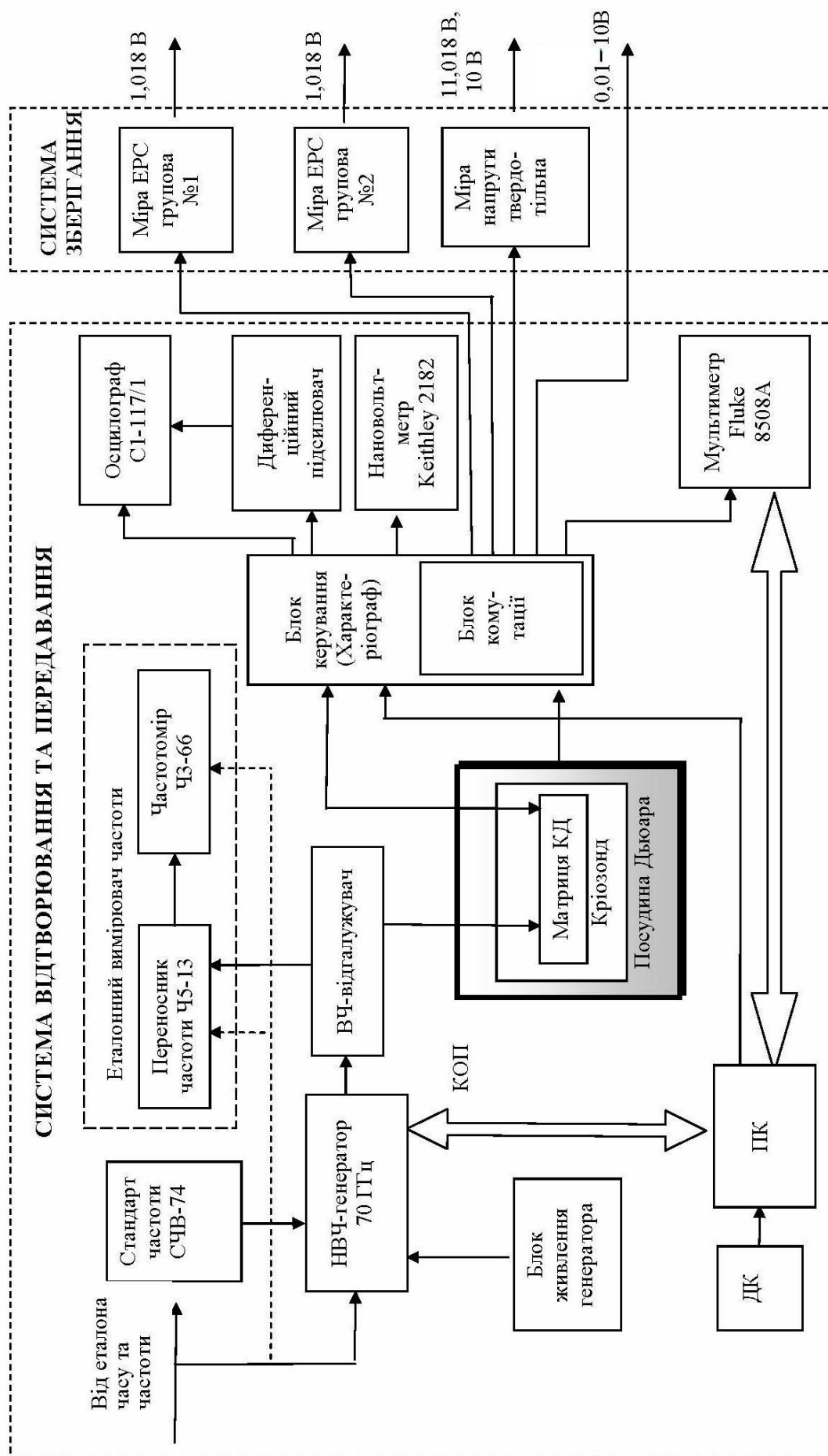


Рисунок 4.7 – Структурна схема первинного еталона одиниці ЕРС (еталон України)

Вихідна напруга з матриці через диференціальний підсилювач подається на вхід Y осцилографа, за допомогою якого спостерігається ВАХ матриці КД.

За допомогою комутатора відбувається перемикання різних режимів роботи еталона, зміна полярності відтвореної напруги, підключення до схеми необхідних приладів та пристроїв. На комутатор накладається ряд вимог, зокрема, термостабільності, заводо захищеності, малого перехідного опору. Особливо це стосується комутатора полярності.

Еталонна напруга, яка виводиться з кріогенного середовища до нормальної температури ($\sim 20^\circ\text{C}$), супроводжується термо-ЕРС, яка є джерелом систематичної похибки. Її вплив значною мірою нейтралізується завдяки вимірюванням при двох полярностях і підрахуванням результату як середнього арифметичного.

Для реалізації цієї методики був розроблений спеціальний комутатор з використанням перемикача фірми «ElectroSwitch». Перемикач має захищені від бруду та вологи контакти, витримує струм до 15 А, має низький опір контактів ($\sim 3\text{ мОм}$), опір ізоляції – більше 10 МОм. Робочі поверхні перемикача вкриті шаром золота. Для зменшення впливу електромагнітних завад і температурних коливань перемикач розміщено у металевому (алюмінієвому) корпусі, внутрішня поверхня якого вкрита шаром термоізолюючого матеріалу (коливання температури в корпусі – не більше $0,1^\circ\text{C}$). Завдяки цій конструкції можна говорити вже не про малу невиключену систематичну похибку через остаточну термо-ЕРС, а про її вилучення за допомогою поправки. Оскільки цей перемикач має достатню кількість контактів і положень, він використовується і для інших комутуючих дій, про які йшла мова вище.

Роль вольтметра при попередньому установленні значень напруги від різних джерел, а також нуль-індикатора при передаванні розміру одиниці виконує нановольтметр Keithley 2182.

4.4.2. Метрологічні характеристики еталона

Типовими складовими невилученої систематичної похибки відтворення одиниці ЕРС є:

θ_1 – похибка вимірювання частоти НВЧ-опромінення f , оцінюється значенням $1 \cdot 10^{-10}$;

θ_2 – похибка через термо-ЕРС, що виникає при виведенні джозефсонівської напруги з кріогенного середовища (температура 4 К) до лабораторних умов (20 °С). Ця похибка може бути зведена до нехтовно малого значення шляхом усереднення вимірювань при позитивній і негативній полярності, про що сказано вище;

θ_3 – похибка через наявність струму витоку ($6 \cdot 10^{-9}$);

θ_4 – похибка через детектування НВЧ потужності на матриці ($1 \cdot 10^{-10}$).

Складовими випадкової похибки є:

S_1 – похибка через нестабільність частоти опромінення f , яка при багаторазових вимірюваннях ($n > 50$) не перевищує $1 \cdot 10^{-11}$;

S_2 – похибка через нестабільність термо-ЕРС, оцінюється значеннями $5 \cdot 10^{-9}$ (при $U=1$ В) і $5 \cdot 10^{-10}$ (при $U=10$ В);

S_3 – похибка через нахил сходинок ВАХ, оцінюється значенням $1 \cdot 10^{-10}$.

Складові і сумарна оцінка похибок, а також перераховані через відомі співвідношення значення невизначеностей державного еталона України для напруги 1 В наведені в табл. 4.1 [29].

Таблиця 4.1 – Складові похибки (невизначеності) відтворення напруги

Складові відносної похибки (невизначеності)	Значення похибки		Стандартна невизначеність	
	S_i	θ_i	Тип	Значення
Похибка визначення частоти опромінення	–	$1 \cdot 10^{-10}$	В	$0,6 \cdot 10^{-10}$
Похибка через нестабільність частоти	$1 \cdot 10^{-11}$		А	$1 \cdot 10^{-11}$
Похибка через термо-ЕРС	$5 \cdot 10^{-9}$		А	$5 \cdot 10^{-9}$
Похибка через наявність струму витоку	–	$6 \cdot 10^{-9}$	В	$3,5 \cdot 10^{-9}$
Нахил сходинок ВАХ	$1 \cdot 10^{-10}$		А	$1 \cdot 10^{-10}$
Детектування НВЧ		$1 \cdot 10^{-10}$	В	$6 \cdot 10^{-11}$
Сумарна оцінка	$5 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$		$6 \cdot 10^{-9}$

4.5. Відтворення напруги змінного струму на ефекті Джоузефсона

Успіхи у створенні еталонів постійної напруги і матриць стимулювали дослідження щодо можливості використання ефекту Джоузефсона для відтворення напруги змінного струму. Наведемо досягнуті на цей час результати.

Формування напруги змінного струму з використанням ефекту Джоузефсона може бути виконане такими методами [28, 30]:

- а) шляхом синтезу відліків постійної напруги U_i за допомогою програмованих матриць;
- б) опроміненням матриці імпульсами зі змінною частотою повторення (кодоімпульсний метод);
- в) шляхом частотної модуляції НВЧ-сигналу, що використовується для опромінення матриці.

Розглянемо ці методи більш докладно.

4.5.1. Метод синтезу відліків (метод програмованої матриці, *PJVS-метод*)

Метод полягає в отриманні серії дискретних відліків постійної напруги з виводів джоузефсонівської матриці і у формуванні східчастого сигналу змінного струму.

Після відповідного програмування система дозволяє синтезувати довільні форми напруги змінного струму. Основною проблемою в реалізації цього методу є створення спеціальних програмованих матриць [26].

Для відтворення напруги змінного струму необхідна швидка і точна перекомутація опорних напруг Джоузефсона. Як показано в дослідженнях РТВ, така перекомутація неможлива з переходами SIS. Таку можливість надають тільки лінійні матриці сильно загасаючих переходів – SINIS і SNS [26;28], однак при цьому збільшується необхідне число переходів.

Матриця із частотою 70 ГГц повинна мати близько 70 000 переходів для одержання напруги 10 В, що у 5 разів більше, ніж у стандартної матриці для одержання постійної напруги. Це говорить про те, що технології виробництва матриць сильно загасаючих переходів мають бути на значно вищому рівні. Якщо з ряду причин потрібно використовувати більш низьку частоту опромінення (близько 20 ГГц), число переходів навіть збільшується пропорційно зменшенню частоти опромінення.

Є й інші проблеми при використанні вже існуючих конструкцій матриць. Тому у РТВ було розроблено більш складну матрицю [28;30], що складається з послідовності бінарних сегментів з $2^0, 2^1, \dots, 2^p$ переходами, кожний з яких запускається окремим джерелом струму.

Програмоване перемикавання на встановлення певної комбінації джерел струму дозволяє швидко вибрати стабільні відліки напруги постійного струму і синтезувати довільні форми напруги змінного струму (рис. 4.8).

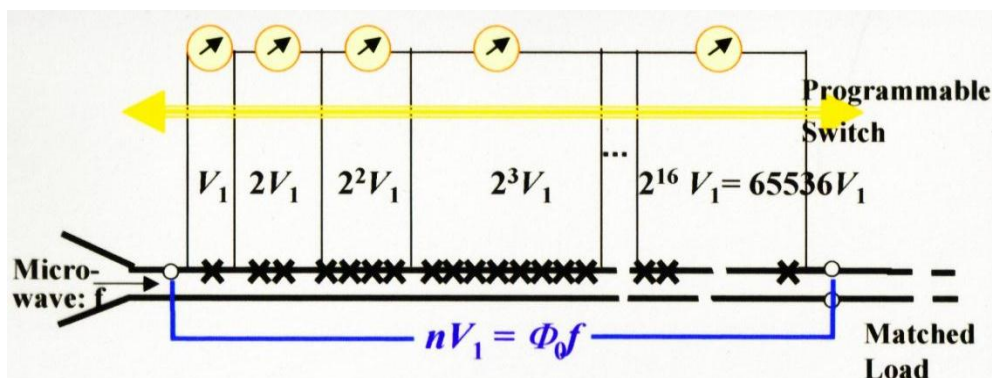


Рисунок 4.8 – Динамічна програмована матриця

Створення таких матриць і всієї системи формування змінної напруги є великим технологічним досягненням. Суттєвою особливістю цього методу є східчаста форма синтезованого сигналу (рис. 4.9).

Хоча невизначеність рівня кожної сходинки не перевищує $5 \cdot 10^{-9}$ на частотах до 500 Гц, у спектрі такого сигналу міститься велика кількість гармонік, що робить цей метод непридатним для ряду задач метрології.

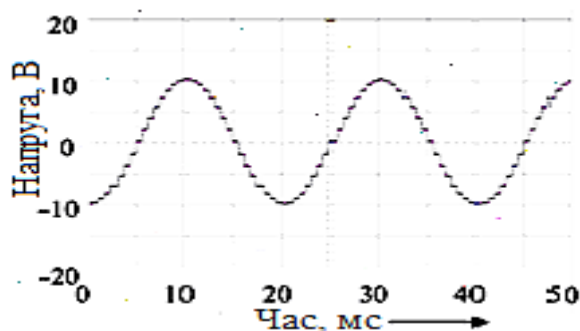


Рисунок 4.9 – Сформований східчастий сигнал змінного струму

4.5.2. Кодоімпульсний метод (JAWS-метод)

Названий вище недолік можна у значній мірі подолати шляхом використання як опромінюючого сигналу не синусоїди, а послідовності імпульсів.

При цьому частота імпульсу $f(t)$ змінюється залежно від бажаної форми хвилі $V(t)=nf(t)\Phi_0$, $\Phi_0=h/2e$. Так з'явився варіант відтворення змінної напруги шляхом опромінення матриці Джозефсона послідовністю імпульсів зі змінною частотою повторення $f(t)$, яка регулюється за допомогою двійкового цифрового коду (сігма-дельта модуляція). Залежно від тривалості окремих імпульсів по переходу буде проходити певне число квантів потоку на імпульс. Шляхом регулювання частоти імпульсу на матриці генерується точно визначена напруга змінного струму. Для цього в найпростішому випадку можна використовувати промисловий високошвидкісний генератор імпульсів. Матриця Джозефсона діє як перетворювач недосконалих імпульсів генератора $U(t)$ в ідеально квантовані імпульси $\int U(t)dt = \Phi_0$. Сьогодні існують промислові генератори біполярних імпульсних кодів для частоти імпульсів до 40 ГГц. Для синтезу хвилі довільної форми добре підходять матриці SNS, тому що їхні оптимальні робочі частоти знаходяться у цьому діапазоні.

Спрощену структурну схему цього методу, який отримав назву «кодо-імпульсний метод», наведено на рис. 4.10.

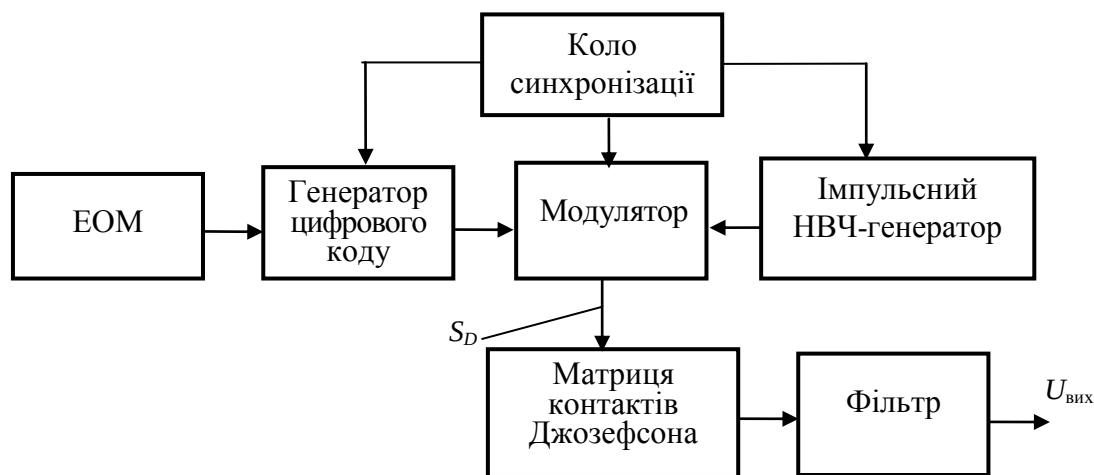


Рисунок 4.10 – Структурна схема реалізації кодоімпульсного методу

Імпульси (рис. 4.11, а) подаються на лінійні матриці переходів Джозефсона, які перетворюють їх у точно квантовані імпульси із площею імпульсу $n\Phi_0$. Далі, за допомогою аналогової низькочастотної фільтрації одержують необхідні форми хвиль $U(t)=nf(t)\Phi_0$, $\Phi_0=h/2e$ (рис. 4.11, б).

Важливим питанням при формуванні еталонної змінної напруги є рівень нелінійних спотворень відносно заданої форми (при синусоїдальній формі – рівень коефіцієнта гармонік).

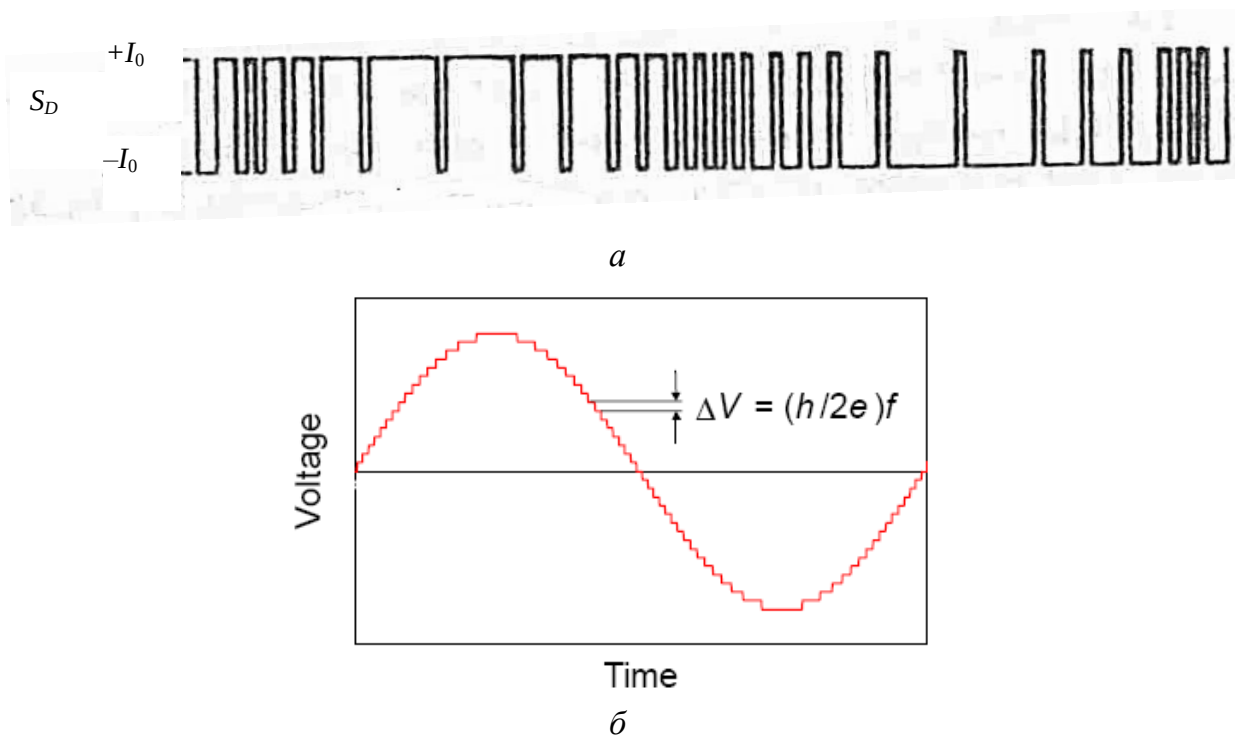


Рисунок 4.11 – Опромінюючий (а) і вихідний (б) сигнали в кодоімпульсному методі

Одержаний у РТВ спектр синтезованої синусоїдної хвилі з частотою 2,5 кГц і напругою 214 мВ зображено на рис. 4.12 [30]. Більш високі гармоніки перебувають на рівні нижче мінус 70 дБм. Тому гармонійні спотворення становлять мінус 66 дБм (коефіцієнт гармонік нехтовно малий), що, безсумнівно, є високим результатом.

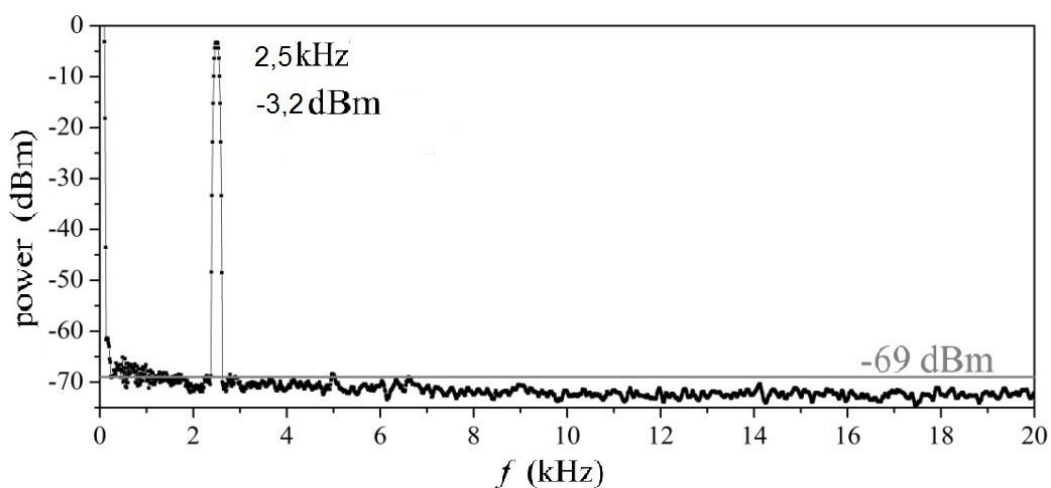


Рисунок 4.12 – Спектр сигналу у JAWS-методі

Основною проблемою для досягнення опорних напруг змінного струму високої амплітуди є конструкція необхідного мікрохвильового кола для однорідного розподілу імпульсів у достатньо великих матрицях.

Як показано у [28,30], метод з використанням програмованої джозефсонівської матриці (*PJVS*-метод) забезпечує високу вихідну напругу (до 10 В), однак її спектр містить чималу кількість гармонік (значні спотворення). Кодоімпульсний метод (*JAWS*-метод) забезпечує чистий спектр, але рівень вихідного сигналу не перевищує 1 В (рис. 4.13).

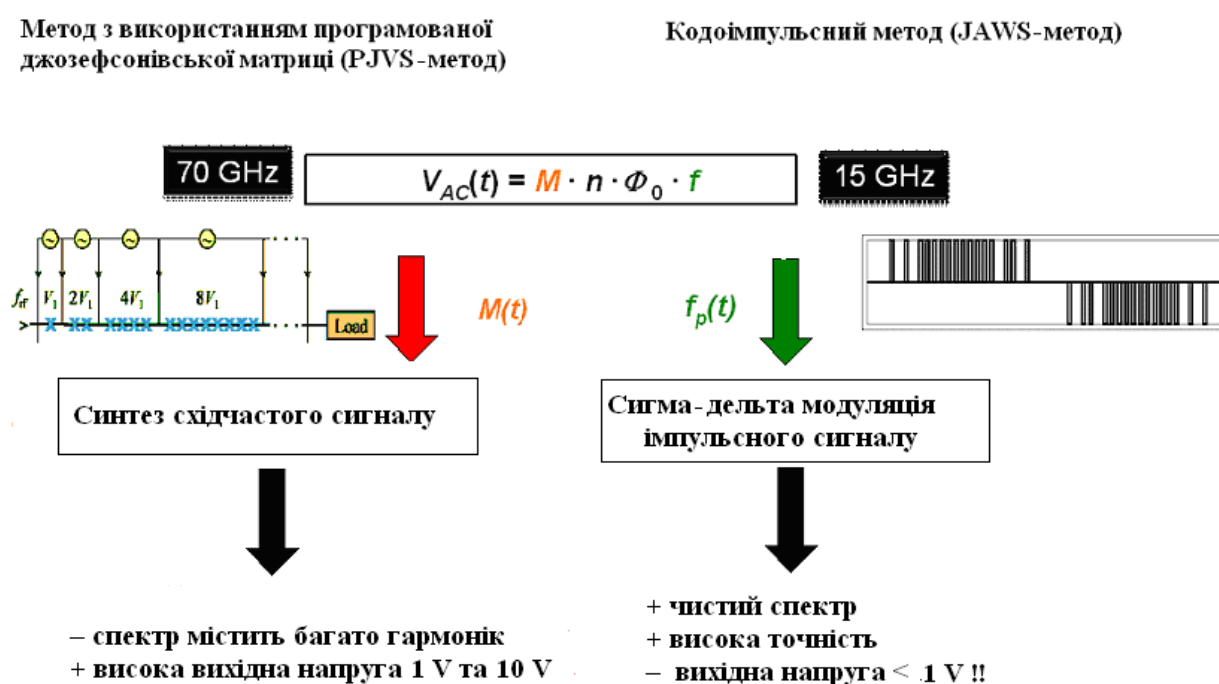


Рисунок 4.13 – Порівняння *PJVS* і *JAWS*-методів

4.5.3. Метод з використанням частотної модуляції НВЧ-опромінення

Перспективним методом відтворення напруги змінного струму є метод частотної модуляції, коли НВЧ-сигнал, який використовується для опромінювання матриці джозефсонівських контактів, модулюється за частотою низькочастотним сигналом (рис.4.14).

Цей метод базується на прямій залежності напруги на виході джозефсонівської матриці відтворення від частоти опромінення

$$U_{\text{вих}} = f(t) n / K_J,$$

де $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга матриці контактів Джозефсона; $f(t)$ – частота опромінювання матриці контактів Джозефсона; n – кількість сходинок матриці контактів Джозефсона; K_J – стала Джозефсона.

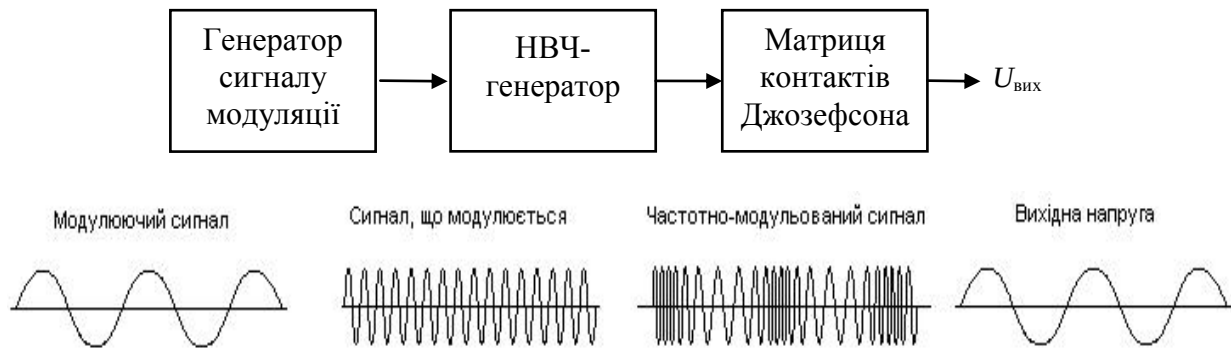


Рисунок 4.14 – Метод частотної модуляції НВЧ-опромінювання

Таким чином, якщо частота опромінювання змінюється за певним законом, то й вихідна напруга буде змінюватися за тим самим законом (за умови, що робоча точка матриці під час модуляції залишається на сходинці).

Цей метод розроблявся в ННЦ «Інститут метрології», розглянемо його докладніше.

ЧМ сигнал, який подається на матрицю, має вигляд

$$u(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin(\Omega t + \varphi)\right),$$

де U_m – амплітуда сигналу; $\omega = 2\pi f$ – несуча частота; $\Omega = 2\pi F$ – модулююча частота; $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ – девіація частоти; φ – постійна фаза.

Частота цього сигналу $\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \omega + \Delta\omega \sin \Omega t$, або $f(t) = f + \Delta f \sin \Omega t$.

На виході матриці маємо напругу

$$u_{\text{вих}}(t) = f(t) \frac{n}{K_J} = \frac{f \cdot n}{K_J} + \frac{\Delta f \sin \Omega t \cdot n}{K_J},$$

яка містить постійну і змінну складові.

Заблокувавши постійну складову, одержимо

$$u_{\text{вих}}(t) = \frac{\Delta f \sin \Omega t \cdot n}{K_J}.$$

Амплітуда цієї напруги (від піку до піку) буде $U_{\Omega} = \frac{2\Delta f \cdot n}{K_J}$.

Таким чином, на виході одержуємо синусоїдальну напругу, частота якої є частота модулюючого сигналу, а амплітуда дорівнює $\frac{2\Delta f \cdot n}{K_J}$, де $2\Delta f$ – подвійна девіація частоти або різниця між $f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$ НВЧ-генератора.

Оцінімо можливий рівень змінної напруги на виході матриці.

Пікова девіація частоти ЧМ сигналу ($2\Delta f$) може без суттєвих спотворень скласти близько 5 % f , $U_{\sim} = 10$ В, тоді $U_{\sim} = 5 \% 10 \text{ В} = 0,5 \text{ В}$. Похибка визначається похибкою вимірювання частот $f_{\max}$ і $f_{\min}$, яка при низьких f може бути на рівні $10^{-9} - 10^{-10}$.

Важливою умовою для реалізації цього методу є необхідність мати досить широку (за струмом) сходинку Джозефсона. Таку сходинку можна отримати за допомогою SINIS-матриці (рис. 4.15). Для мікроструктури Джозефсона типу SINIS n дорівнює одиниці.

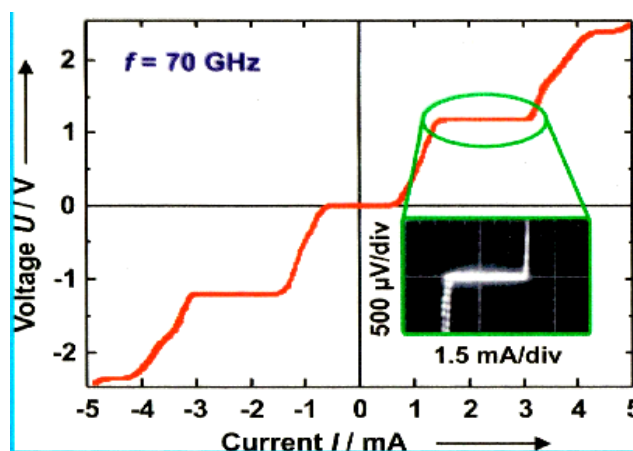


Рисунок 4.15 – Вольт-амперна характеристика SINIS-матриці

Експериментальні дослідження показали працездатність цього методу, але для уточнення його можливостей щодо рівня відтвореної змінної напруги і частотного діапазону необхідні подальші поглиблені дослідження. Вже зараз можна сказати, що ці параметри пов'язані з параметрами матриці, зокрема з рівнем відтворюваної постійної напруги і шириною сходинки її вольт-амперної характеристики.

Реалізація цього методу потребує наявності генератора НВЧ з керованою зміною частоти вихідного сигналу. Модульований сигнал може бути отриманий або від генератора з частотною модуляцією, або за допомогою швидкодіючого синтезатора частоти з малим кроком перестроювання частоти.

Однією з вимог до джерела НВЧ-опромінювання є лінійність його модуляційної характеристики, тобто отримання заданого закону зміни частоти з малими спотвореннями.

4.5.4. Комбінований (PJVS+JAWS) метод

В останні роки у *PTB* розроблено комбінований (*PJVS+JAWS*) метод, який поєднує позитивні якості обох методів, тобто дозволяє одержати рівень напруги до 10 В з високою спектральною чистотою [28;30]. Схему його реалізації наведено на рис. 4.16.

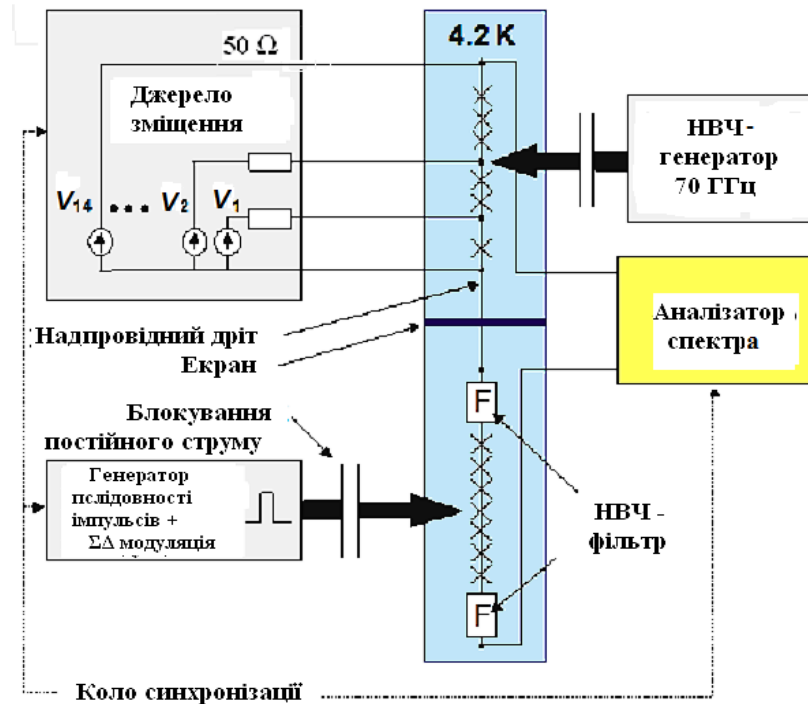


Рисунок 4.16 – Комбінований (*PJVS+JAWS*) метод

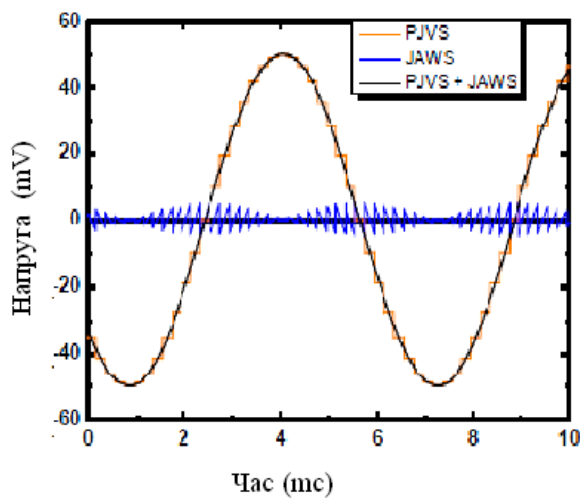
Поетапно синтезують сигнал методом *PJVS* і на нього накладають сигнал *JAWS* (метод суперпозиції). Експеримент показує, що при коректній реалізації і синхронізації сигнал *JAWS* здатний суттєво згладити стрибки напруги, які виникають у сигналі *PJVS*.

На рис. 4.17 наведено часове і спектральне відображення сигналів, з яких видно, що в сумарному сигналі всі вищі гармоніки зменшені до рівня близько мінус 100 дБ.

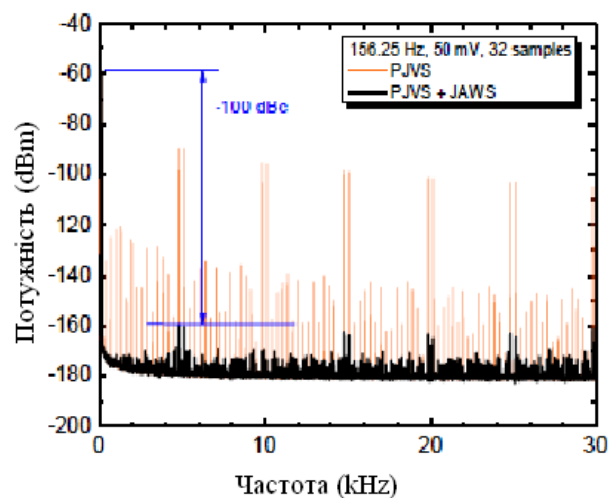
Невизначеність відтворення синусоїдальної напруги оцінюється значенням $(3-5) \cdot 10^{-8}$ на частотах до 200 кГц.

Оцінимо значення одержаних результатів для метрології змінної напруги. В існуючій сьогодні системі еталонів змінна напруга відтворюється в діапазоні частот від 10 Гц до 1–2 ГГц і в діапазоні напруг від 1000 В (у НЧ-діапазоні, на частотах 20 Гц – 1 кГц) до 1 В у ВЧ-діапазоні (1–2 ГГц), а основним методом вимірювання є метод теплового компарування. При цьому невизначеність відтворення становить:

- $0,5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ – в діапазоні частот 10 Гц – 30 МГц;
- $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-2}$ – в діапазоні частот 30 МГц – 2 ГГц.



Східчастий синтезований сигнал (PJVS), сигнал JAWS та їх суперпозиція



Спектри східчастого генерованого сигналу (червона крива) та накладеного сигналу (чорна крива)

Рисунок 4.17 – Часове і спектральне відображення сигналів у (PJVS+JAWS) методі

Порівняння з результатами, одержаними за допомогою ефекту Джозефсона (U до 10 В при $f < 200$ кГц, невизначеність $10^{-8}-10^{-9}$), показує, що останній не здатний замінити метод теплового компарування в існуючій системі еталонів змінної напруги (перш за все, за частотними і динамічними діапазонами), але дозволяє досягти набагато вищої точності в НЧ-діапазоні. Тому еталони змінної напруги на ефекті Джозефсона мають своє особливе значення для метрології, яке полягає в можливості атестації і калібрування існуючих еталонів змінної напруги, а також у проведенні особливо точних вимірювань у найбільш уживаному діапазоні частот до 1 МГц [31].

4.6. Застосування ефекту Джозефсона у промисловості і приладобудуванні

Одною з тенденцій застосування і подальшого розвитку вимірювальних технологій з використанням ефекту Джозефсона є створення не тільки еталонів вищого рівня, але й робочих еталонів більш широкого використання, а також приладів і вимірювальних систем дослідницького і промислового призначення.

Наведемо деякі приклади таких приладів, створених на основі цього ефекту [31].

4.6.1. Надпровідний квантовий інтерферометричний датчик (НКВІД)

Одним з перших застосувань ефекту Джозефсона було створення на його основі надзвичайно чутливого датчика магнітного поля (магнітометра), який одержав назву НКВІД (надпровідний квантовий інтерферометричний датчик).

Розглянемо вплив зовнішнього магнітного поля на переходи Джозефсона. Рівняння Джозефсона для надпровідного струму у стаціонарному режимі має вигляд

$$I = I_c \sin \varphi,$$

де φ – різниця фаз хвильових функцій по різні сторони КД (рис. 4.1).

Суть впливу магнітного поля на надпровідник полягає в тому, що воно змінює фазу надпровідного струму. Припустимо, що спочатку через КД йде надпровідний струм (стаціонарний режим), магнітне поле дорівнює нулю. Тоді струм є однаковим у всіх точках контакту (рис. 4.18, а).

Якщо включити магнітне поле, перпендикулярне напрямку струму, розподіл струму змінюється: при $H = H_0/2$ на довжині контакту буде укладатись півхвилі струму (б), при $H = H_0$ – ціла хвиля, однак половина електронів буде йти уверх, половина – униз, а сумарний струм буде дорівнювати нулю (в).

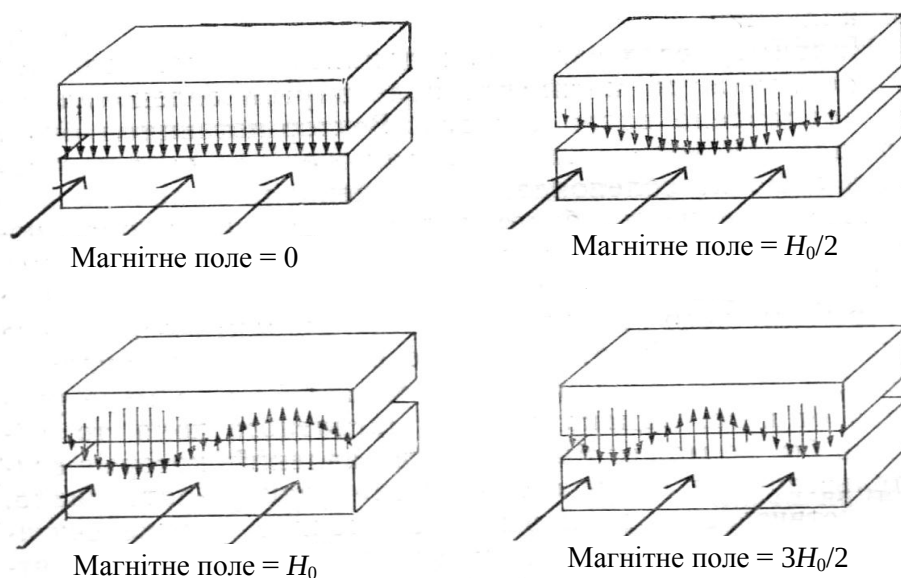


Рисунок 4.18 – Вплив магнітного поля на КД

При подальшому збільшенні напруженості поля, наприклад, при $H = 3/2 H_0$ (г), на контакті буде укладатись півтори хвилі, сумарний струм

з'явиться, але зменшиться у порівнянні зі струмом, що з'являється у випадках (б) і (в). Залежність постійного тунельного струму через контакт Джозефсона від напруженості зовнішнього магнітного поля подана на рис. 4.19.

В точках $\Phi_0, 2\Phi_0, \dots, n\Phi_0$ відбувається стрибкоподібна зміна фази струму.

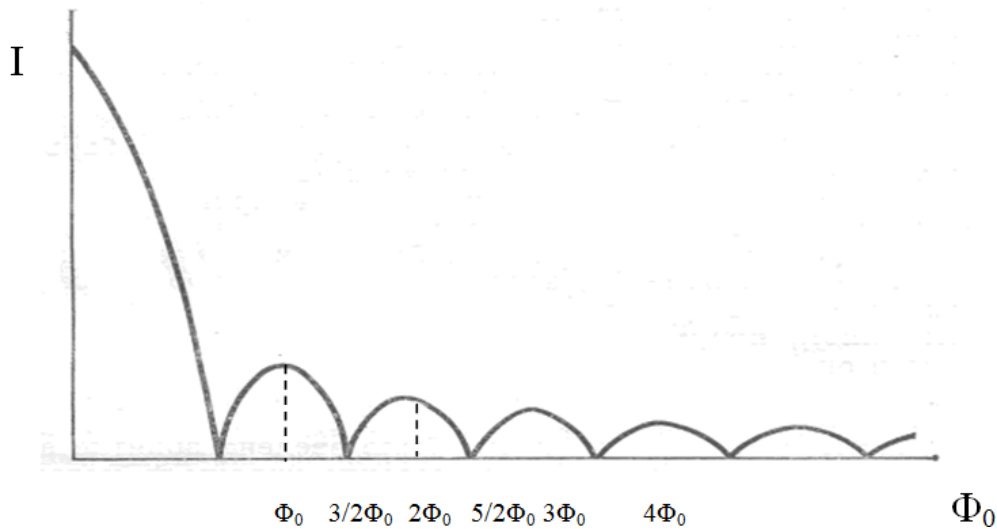


Рисунок 4.19 – Залежність струму через КД від зовнішнього магнітного поля

Якщо прилад Джозефсона виконати у вигляді надпровідного кільця, що містить два паралельно включені КД (A і B на рис. 4.20) і помістити його в зовнішнє постійне магнітне поле Φ , то різницю фаз між точками A і B можна записати $\varphi_A - \varphi_B = 2\pi \Phi/\Phi_0 + 2\pi n$, де φ_A і φ_B – стрибкоподібна зміна фази на переходах A і B .

Член $2\pi n$ показує, що при однозначній хвильовій функції різниця фаз $\varphi_A - \varphi_B$ може змінюватись на число, кратне 2π .

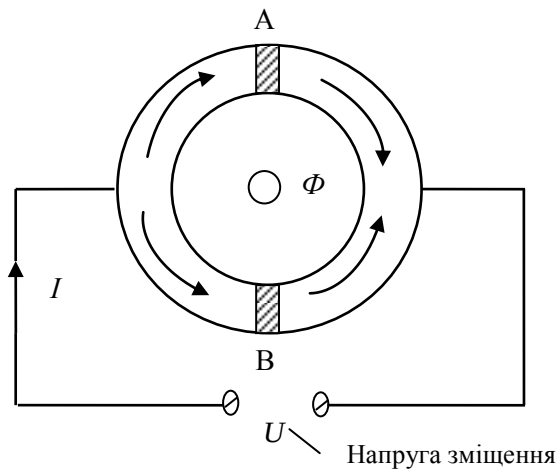


Рисунок 4.20 – Надпровідне кільце з двома КД

Запишемо ці стрибки фаз у вигляді:

$$\varphi_A = \varphi_0 + \pi \Phi/\Phi_0 + \pi n$$

$$\varphi_A = \varphi_0 - \pi \Phi/\Phi_0 - \pi n.$$

Тоді вираз для повного струму в колі має вигляд

$$I_c = 2I_1 \sin \varphi_0 \left| \cos \pi \Phi/\Phi_0 \right|.$$

Періодична залежність струму в системі з двох КД від зовнішнього магнітного поля Φ (рис.4.21) стало підґрунтям для створення спеціальних вимірювальних приладів – НКВІД.

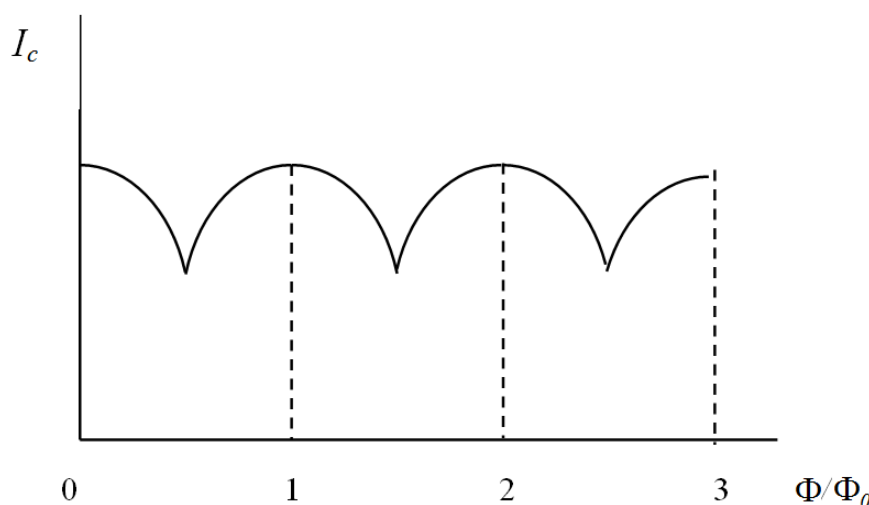


Рисунок 4.21 – Залежність струму від магнітного поля в кільці з двома КД

НКВІД може бути постійного і змінного струмів. Він забезпечує надзвичайно високу чутливість (близько $1 \cdot 10^{-13}$ Тл), що дозволяє використовувати їх для вирішення ряду задач метрології: вимірювання дуже малих напруг, струмів, енергії і магнітної індукції, відношення цих величин, компарування, створення стабільних джерел.

Наведемо приклад реалізації НКВІД постійного струму з негативним зворотним зв'язком, який знайшов найпоширеніше використання (рис. 4.22). На поєднанні паралельно КД подається постійний струм зміщення, а перетворювач Джозефсона поміщається у змінне магнітне поле, що створюється котушкою збудження і генератором з частотою близько 10 кГц. Змінний струм, що виникає на перетворювачі Джозефсона, синхронно детектується за основною частотою. Сигнал на виході синхронного детектора є осцилюючою функцією, період якої дорівнює Φ_0 . Він підсилюється і вводиться у котушку збудження. Система зворотного зв'язку підтримує робочу точку $\Phi = (n + 1/2) \Phi_0$.

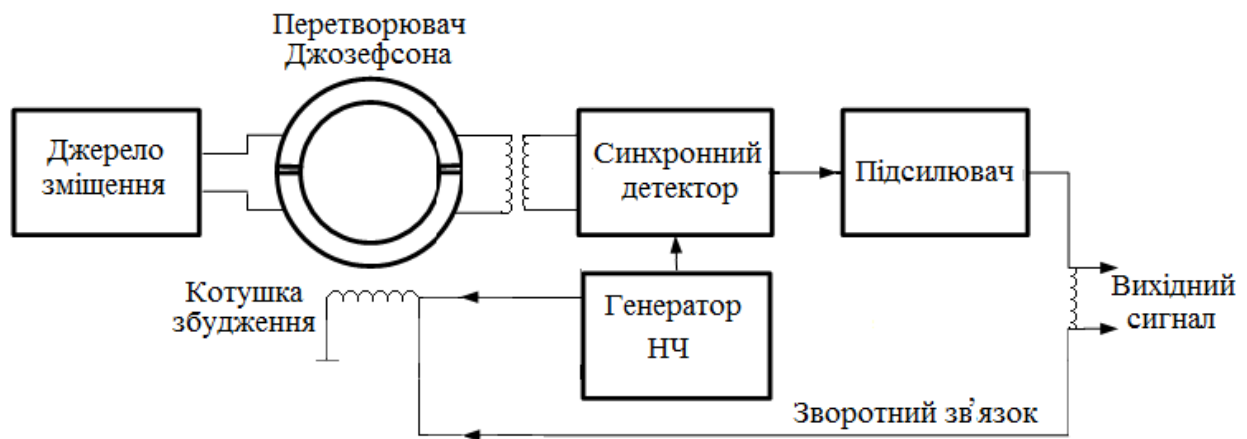


Рисунок 4.22 – Прилад зі НКВІД постійного струму

Найчастіше НКВІД постійного струму використовується для компарування електричних величин (U , I , H), тобто є високочутливим нуль-індикатором, але можуть бути і безпосередніми вимірювачами малих значень магнітної індукції.

4.6.2. Квантовий вольтметр

У деяких країнах (Німеччина – PTB, США – NIST) на базі розроблених методів створено квантовий DC/AC-вольтметр (постійної та змінної напруги). Основними пристроями в режимі змінного струму є джоузефсонівське джерело напруги (на базі бінарної програмованої матриці PJVS), цифро-аналоговий перетворювач і нуль-детектор, блоки керування і синхронізації (рис. 4.23).

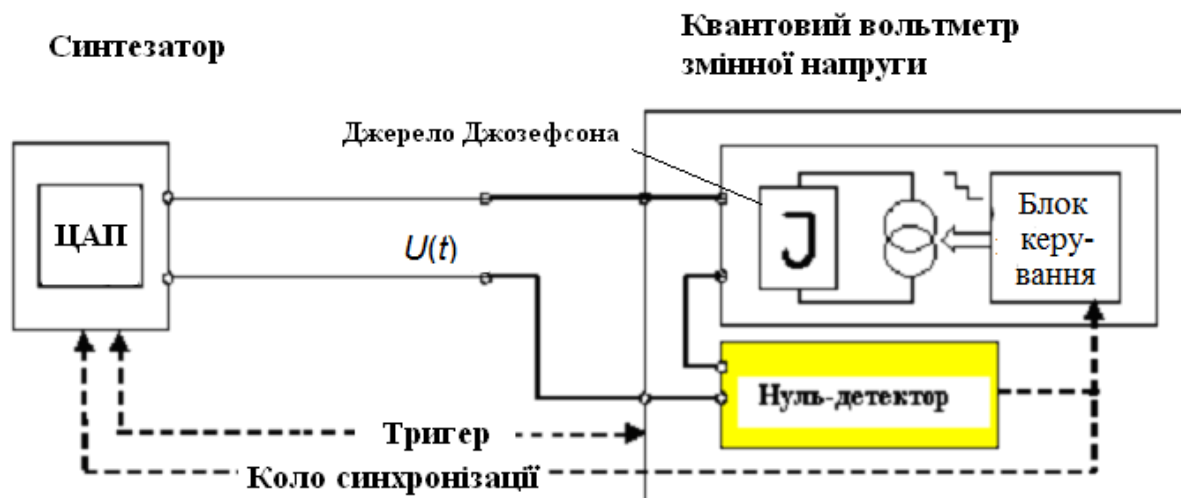


Рисунок 4.23 – Квантовий вольтметр

ЦАП і нуль-детектор при відповідній часовій синхронізації забезпечують відсутність переходів (стрибків напруги) між сходами. Вхідний і вихідний тригери, які забезпечують синхронізацію, пов'язані оптично.

Невизначеність вимірювання становить $1 \cdot 10^{-9}$ у діапазоні частот до 1 кГц.

4.6.3. Апаратура *Supra VOLT control* (Німеччина)

Supra VOLT control є повністю автоматичною еталонною системою на основі ефекту Джозефсона, має режими постійного і змінного струму (рис.4.24).



Рисунок 4.24 – Апаратура *SupraVOLTcontrol*

Supra VOLT control доступна у двох версіях: у першій використовується рідкий гелій як холодоагент; у другому варіанті – охолоджувач імпульсного типу.

Метрологічні характеристики системи.

В режимі постійного струму:

Постійна напруга до ± 10 В. Типова похибка калібрування (пряме порівняння з іншою напругою Джозефсона) $\Delta V/V_{10V} = 4 \times 10^{-10}$.

В режимі змінного струму:

Напруга змінного струму до 1 В, частота до 1 кГц. Типова похибка калібрування $\Delta V/V = 2 \times 10^{-8}$.

4.6.4. Міст для вимірювання імпедансів на змінному струмі з фундаментальною точністю

У РТВ розроблено прецизійні мости на двох джозефсонівських джерелах змінної напруги, які використовують бінарні програмовані матриці (метод PJVS). Структурну схему моста наведено на рис. 4.25 [32].

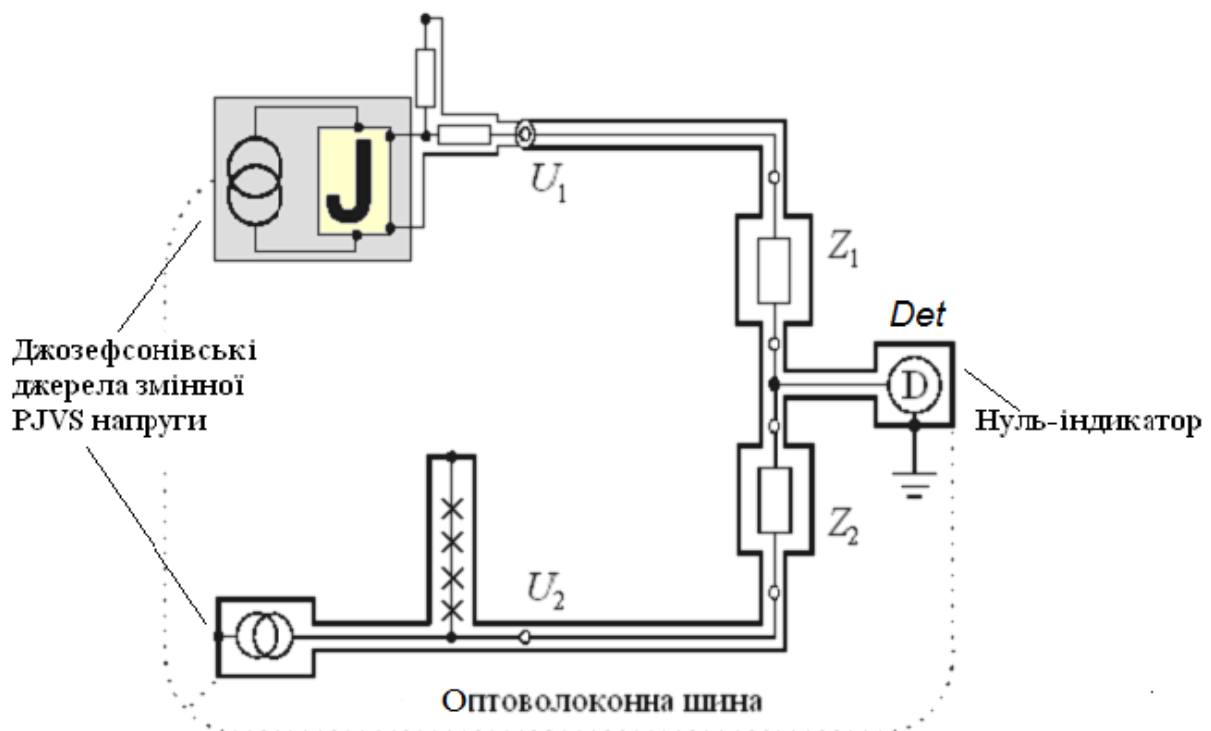


Рисунок 4.25 – Міст змінного струму на пристроях Джозефсона

Процедура вимірювання включає:

- попереднє регулювання струму моста кількістю переходів;
- точне врівноваження моста регулюванням частоти в одній матриці;
- регулювання фазового кута за допомогою електронної синхронізації (роздільна здатність 1 пс).

Метод дозволив проводити порівняння опорів 10 кОм із невизначеністю $1 \cdot 10^{-8}$, ємностей 100 пФ із невизначеністю $1 \cdot 10^{-7}$ у діапазоні частот від 25 Гц до 10 кГц, а також вимірювати відношення імпедансів із фундаментальною точністю. Це є, безумовно, видатним досягненням.

4.6.5. Еталон потужності на промисловій частоті

Як відомо, саме на промисловій частоті (50, 60 Гц) є постійна потреба у підвищенні точності і достовірності вимірювання потужності електричного струму, оскільки вона є основою комерційних розрахунків між виробниками і споживачами електроенергії на всіх рівнях.

Усі національні еталони електричної потужності наразі будуються на основі простежуваності до первинних еталонів постійної напруги (через DC/AC-перетворення) і електричного опору, а основним методом DC/AC-перетворення є метод теплового компарування. Саме похибка DC/AC-перетворення є домінуючою похибкою відтворення потужності. Використання методів прямого відтворення змінної напруги на основі ефекту Джоузефсона, безумовно, призведе до зниження невизначеності еталона, орієнтовно, на порядок.

Як показано у [30], у РТВ такий еталон уже створено.

Також можна передбачати, що і в еталоні сили струму в діапазоні низьких частот, який сьогодні ґрунтується на методі теплового компарування, буде впроваджено один із наведених вище методів відтворення змінної напруги з використанням ефекту Джоузефсона.

4.6.6. Джоузефсонівська міра напруги без рідкого гелію

Одним із факторів, який істотно ускладнює поширення сфери застосування приладів на ефекті Джоузефсона, є необхідність використання в ньому рідкого гелію. Ця обставина підвищує вартість приладів, ускладнює процедуру вимірювань, вимагає створення спеціальної інфраструктури. Тому одним із напрямків подальших досліджень у цій галузі є створення джоузефсонівських мір із використанням більш простих охолоджувачів (кулерів), що не потребують рідкого гелію. На цьому напрямку досягнуто певних успіхів, і відомо, що ряд країн уже розробив прилади, в яких замість рідкого гелію використовуються імпульсні охолоджувачі. Вони мають свої позитивні якості, проте не є суттєво простішими і дешевшими.

Відомо також, що окрім РТВ і NIST, Національний метрологічний інститут Японії (AIST) теж бере участь у розробленні програмованого джоузефсонівського еталона напруги без рідкого гелію як еталона напруги наступного покоління, з використанням переходів Джоузефсона NbN–TiN–NbN. Ці переходи можуть активуватися за температури приблизно 10 К компактним охолоджувачем. У матеріалах AIST указується, що в цьому методі можна,

крім усунення необхідності використання рідкого гелію, досягти зменшення часу встановлення напруги, збільшити стійкість до шуму та використовувати мікрохвилі з частотою близько 20 ГГц замість традиційних 70 ГГц. У результаті цих удосконалень обладнання буде простішим і зручним у використанні. На цей час AIST успішно розробив систему, що може генерувати квантову напругу 1 В, і у даний час близький до створення системи генерування 10 В.

4.6.7. Міра з використанням високотемпературної надпровідності

Варто звернутись до публікації [31] про розробку мікросхеми, яка працює в умовах *високотемпературної надпровідності* при T від 75 до 77 К, видає напругу 25 мВ при частоті опромінення 73–74 ГГц. На її основі розроблена міра напруги, яка відтворює постійну напругу від 0 до 10 В з кроком 0,1 В і невизначеністю $5 \cdot 10^{-8}$.

4.6.8. Інші сфери застосування

Іншими важливими сферами застосування ефекту Джозефсона є:

- відтворення основної одиниці SI від електрики – ампера – за законом Ома (разом із квантовим ефектом Холла, на основі якого відтворюється одиниця електричного опору); докладніше про це буде далі;
- участь у відтворенні ряду одиниць в електричних та інших галузях вимірювань (передача розміру вольту 12 первинним еталонам);
- участь у створенні природного еталона кілограма за принципом порівняння електричної і механічної енергії за допомогою «ват-вагів»;
- вимірювання напруги так званого «шуму Джонсона» у шумовій термометрії;
- вимірювання частоти НВЧ і оптичного діапазону (що є проблемою) на основі розв'язання зворотної задачі: $f_0 = 2eU/h$ [33].

Висновки

- З 1946 р. і по цей час у SI діє визначення ампера через механічні величини. Методологія відтворення ампера (і інших електричних одиниць), що обумовлена цими визначеннями, не забезпечувала необхідної точності, стабільності, доступності для практичної метрології і гальмувала подальший розвиток електричних вимірювань.

- Ситуація суттєво змінилась з відкриттям ряду квантових ефектів і використанням їх для відтворення електричних одиниць (квантові ефекти Джозефсона, Холла, ядерного магнітного резонансу).

- У 1990 р. МКМВ рекомендував застосування квантових ефектів для відтворення вольт (ефект Джозефсона) і ома (квантовий ефект Холла), а також затвердив значення сталих Джозефсона і Клітцинга для використання їх у відповідних вимірюваннях. Одиниці, що відтворюються за допомогою квантових ефектів, стали називати «практичними».

- Метод, що ґрунтується на ефекті Джозефсона, дозволяє з використанням сучасних технологій відтворити напругу постійного струму в діапазоні до 10 В з невизначеністю $10^{-8} - 10^{-9}$. Ряд країн, у тому числі Україна, створили первинний еталон вольт на основі цього ефекту.

- Ефект Джозефсона може бути застосовано також для відтворення напруги змінного струму за допомогою таких вимірювальних технологій:

- синтезу відліків постійної напруги з використанням спеціальної динамічної матриці;

- опромінення імпульсами зі змінною частотою повторення;

- частотної модуляції НВЧ-опромінення матриці.

- Ефект Джозефсона застосовується в метрології також для відтворення основної одиниці в електриці – ампера (разом з квантовим ефектом Холла), а також при створенні природного еталона кілограма (див. розділ 8).

- Тенденціями подальшого розвитку вимірювальних технологій з використанням ефекту Джозефсона є:

- створення не тільки еталонів вищого рівня, але робочих еталонів і приладів більш широкого призначення – дослідницького і промислового;

- спрощення технологій реалізації ефекту в напрямках відмови від використання рідкого гелію і впровадження високотемпературної надпровідності.

Контрольні питання

1. Обґрунтуйте тезу, що існуючі визначення електричних одиниць базуються на механічних вимірюваннях.

2. Що таке надпровідність, за яких умов вона виникає?

3. На яких фізичних явищах базується ефект Джозефсона?

4. Ефект Джозефсона: фізична суть і використання в метрології.

5. Яку фізичну величину відтворюють за допомогою ефекту Джозефсона?
6. Які основні пристрої входять до схеми реалізації ефекту Джозефсона?
7. У чому полягають основні переваги ефекту Джозефсона над іншими методами в метрологічному аспекті?
8. Які інші пристрої входять до складу еталона вольт, крім міри на ефекті Джозефсона?
9. Що таке матриця контактів Джозефсона і яку роль вона відіграє в еталоні?
10. Чи можна використовувати ефект Джозефсона для вимірювання напруги змінного струму?
11. Які застосування ефекту Джозефсона в метрології ви знаєте?
12. Яку орієнтовну невизначеність відтворення напруги має еталон на ефекті Джозефсона (постійної, змінної)?

Розділ 5

КВАНТОВИЙ ЕФЕКТ ХОЛЛА ТА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Як показано у підрозд. 4.1, квантовий ефект Холла (разом з ефектом Джозефсона) був одним із тих фізичних явищ, які докорінно змінили ситуацію в електричній метрології, його визнання в 1988 р. привело до створення практичної системи одиниць в електриці. Розгляду суті даного ефекту і його метрологічних можливостей присвячено цей розділ.

5.1. Фізичні основи квантового ефекту Холла

Розглянемо спочатку «звичайний ефект Холла», відкритий відомим фізиком у 1879 р. Він полягає в тому, що у металі, або в напівпровіднику зі струмом, який поміщено в магнітне поле, перпендикулярне до вектора напрямку струму, виникає поперечне електричне поле і різниця потенціалів – ЕРС Холла E_x . Причиною ефекту Холла є відхилення електронів, які рухаються в магнітному полі, під дією сили Лоренца. На рис. 5.1 вказані напрямки магнітної індукції B і струму I , швидкості електронів v і сили Лоренца $F_{\text{Лор}}$, а також знаки зарядів, що накопичуються на верхній і нижній поверхнях металу або напівпровідника. Відхилення електронів магнітним полем буде мати місце, поки дія сили в поперечному електричному полі не врівноважить силу Лоренца.

ЕРС Холла становить $E_x = R_x \frac{IB}{l}$, де I – сила струму; B – індукція магнітного поля; l – поперечний розмір зразка; R_x – «опір Холла». Опір R_x є обернено пропорційним до щільності електронів на поверхні ρ (рис. 5.2, крива a).

У 1980 р. німецький фізик Клітцинг під час експериментів у лабораторії сильних магнітних полів у Греноблі виявив, що холлівський опір за температури, близької до абсолютного нуля ($T \leq 1,5$ К), і сильному магнітному полі ($B > 3$ Тл) набуває дискретних значень. На залежності R_x від щільності електронів (рис. 5.2), яка при звичайному ефекті Холла має монотонний характер, виникають серії плато, тобто має місце квантування опору [6].

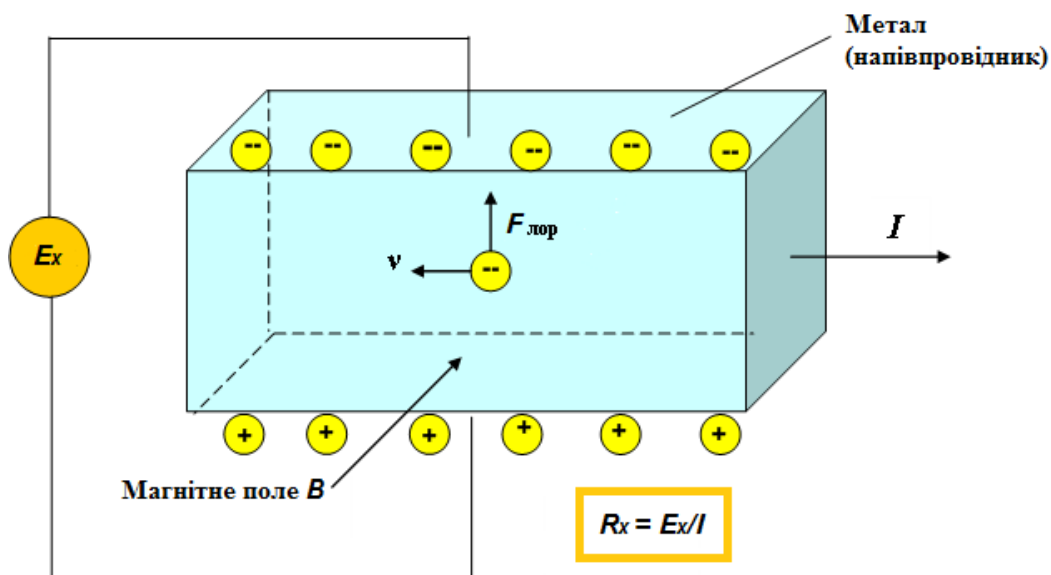


Рисунок 5.1 – «Звичайний» ефект Холла

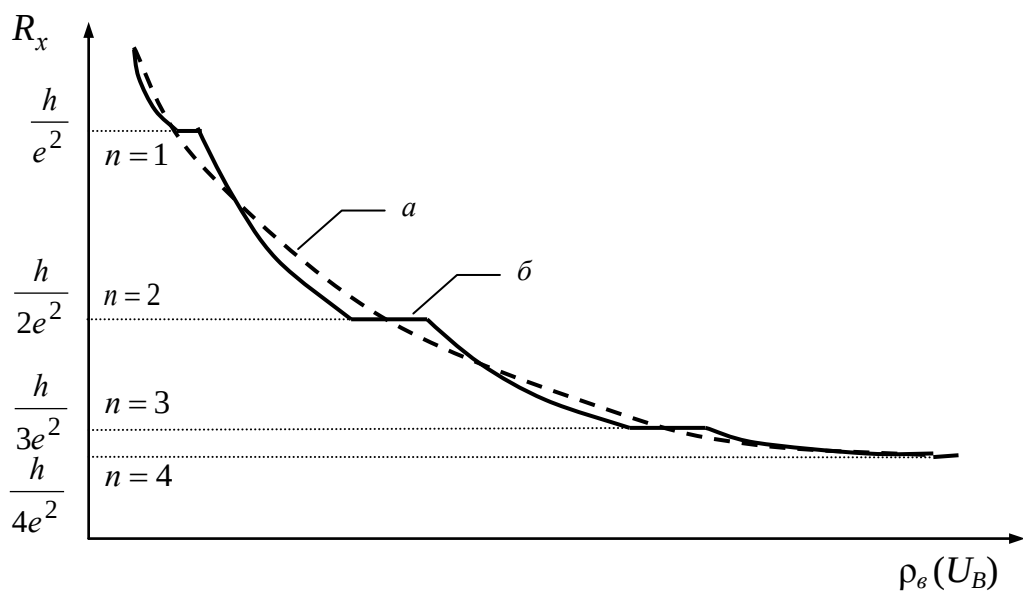


Рисунок 5.2 – Залежність холлівського опору від щільності електронів у каналі:

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

Залежність R_x від магнітної індукції також набуває квантованого характеру (рис. 5.3), а подовжній опір досягає нульового значення під час квантування холлівського опору (рис. 5.3, нижня пікоподібна крива).

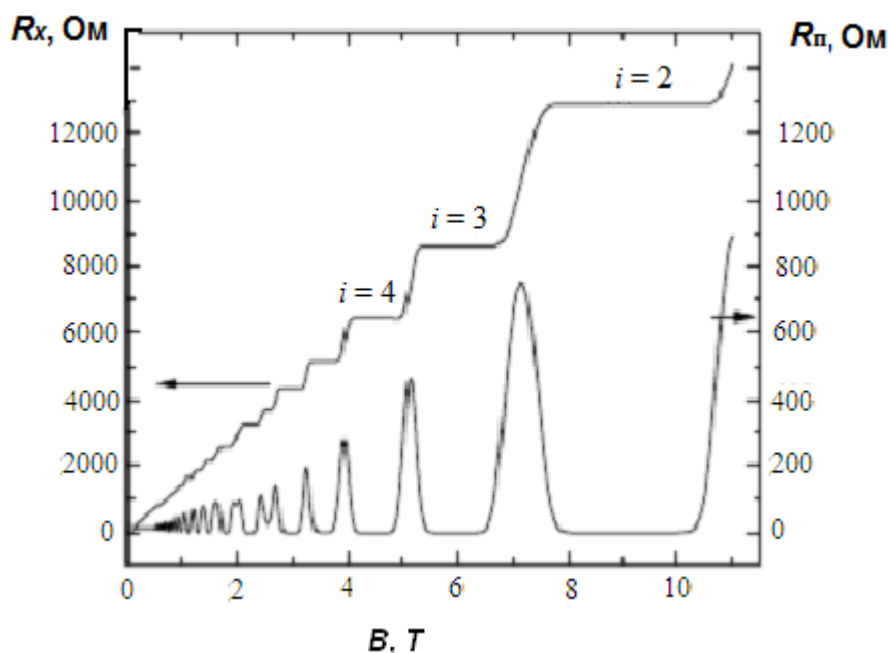


Рисунок 5.3 – Залежність холлівського і подовжнього опору від магнітної індукції

Було також виявлено, що значення холлівського опору на плато з високою точністю дорівнюють відношенню $R_x = \frac{h}{e^2 n}$. Ефект спостерігався в структурі типу метал – діелектрик – напівпровідник (МДН), яка являла собою масивний кристал напівпровідника (Si) з нанесеним на ньому шаром діелектрика (SiO_2), вкритим металевою плівкою (рис. 5.4, а), а також у спеціальних пристроях, які одержали назву *гетероструктур* (рис. 5.4, б).

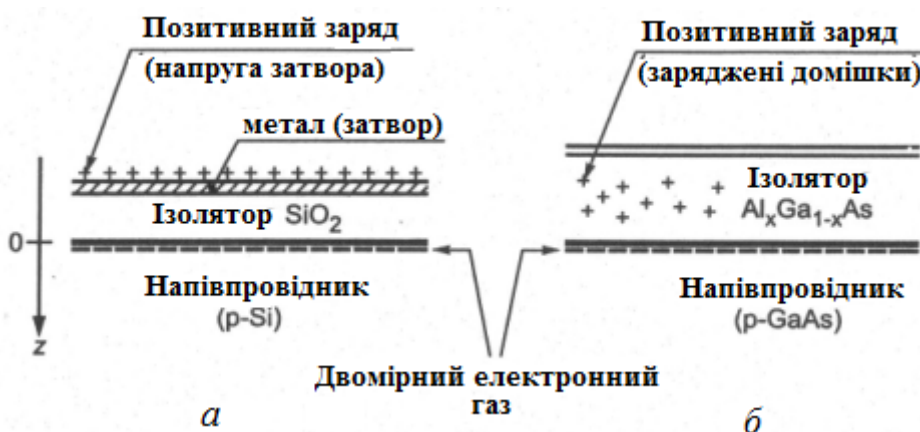


Рисунок 5.4 – Структури «метал – діелектрик – напівпровідник»

Квантовий ефект Холла пояснюється таким чином [34, 35]. Якщо товщина металевої плівки d надзвичайно мала і співрозмірна з міжатомною відстанню,

поступальний рух електронів уздовж однієї з осей, наприклад Z , є неможливим, через що рух електронів є двовимірним у площині $X - Y$. Така структура одержала назву «двовимірної електронної системи».

Типовим прикладом двовимірної електронної системи, в якій спостерігається КЕХ, є наведена вище структура метал – діелектрик – напівпровідник (МДН-структура), створена парою метал – напівпровідник, розділеними тонким шаром діелектрика. Така структура являє собою плоский конденсатор, обкладинками якого є метал і напівпровідник (рис.5.5). При поданні напруги V_g між цими обкладинками у приповерхневій області напівпровідника виникає тонкий провідний електронний шар (інверсійний канал), що являє собою двовимірну електронну систему.

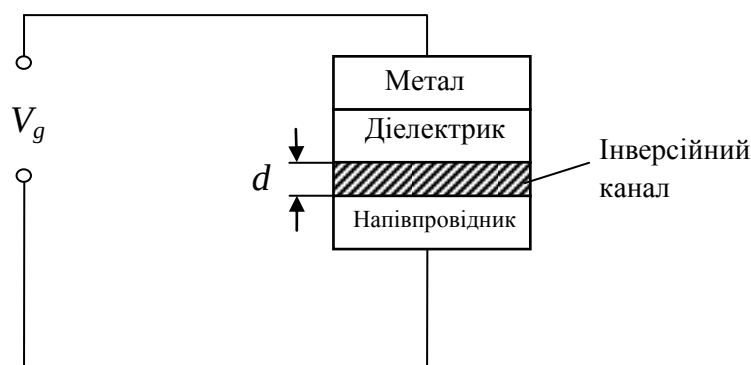


Рисунок 5.5 – Схема двовимірної структури

Відомо, що в разі локалізації електрона в обмеженій області простору, він, згідно з законами квантової механіки, може мати не які завгодно значення енергії, а лише ряд строго визначених дискретних значень.

У випадку малої товщини d рух електронів має локалізований характер. Крім того, завдяки наявності магнітного поля рух електронів в площині $X - Y$ буде проходити за циклотронною орбітою, що має форму кола, і буде обмежений радіусом цього кола, а рух електронів уздовж осі Z буде обмежений малою товщиною d двовимірного шару.

Таким чином, рух електрона буде локалізовано в обмеженій області за всіма трьома координатами X, Y, Z , що веде до появи дискретизації його енергетичного спектра (квантування).

Зовнішній вигляд двовимірної структури наведено на рис. 5.6, а подовження і холлівська напруги і відповідні опори – на рис. 5.7.

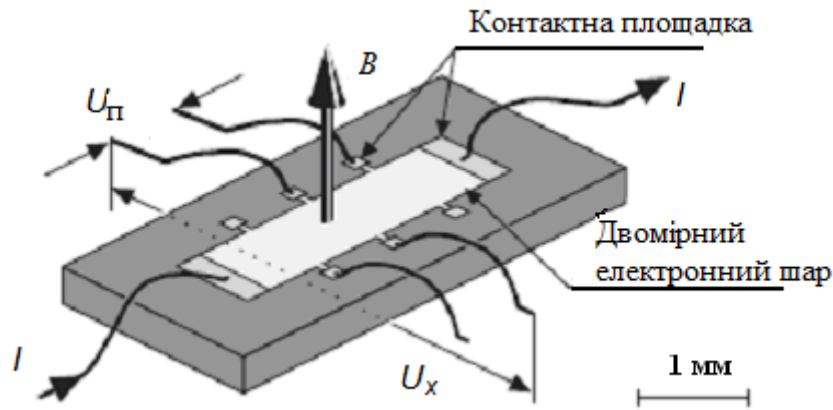


Рисунок 5.6 – Холлівська двобірна структура

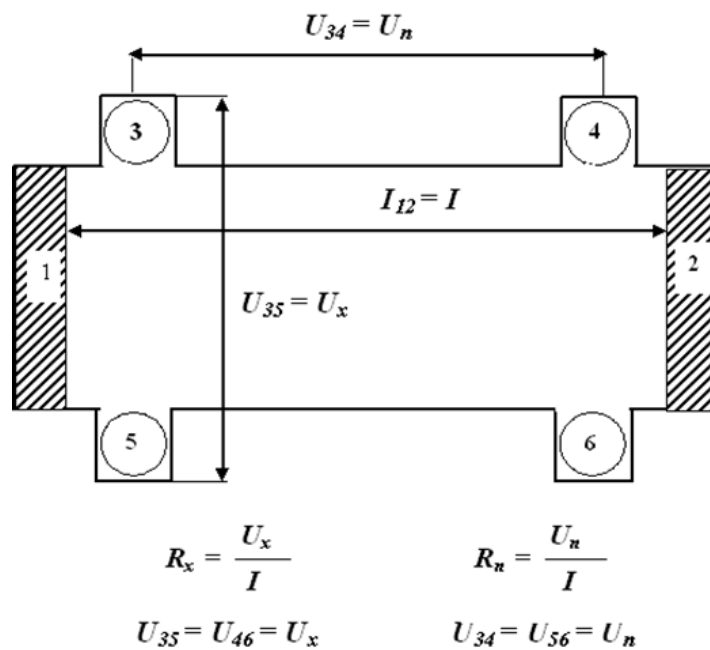


Рисунок 5.7 – Схема холлівської двобірної структури

КЕХ, на відміну від інших ефектів, був спочатку виявлений експериментально, і вже потім для його пояснення були притягнуті зусилля теоретичної фізики, зокрема, рівняння Шредінгера для електрона в магнітному полі, теорія електричних рівнів Ландау тощо. В результаті було одержано задовільне теоретичне пояснення ефекту і його основної формули, а головне, була підтверджена незалежність ефекту і його формули від матеріалів, геометрії, технології, умов навколишнього середовища тощо.

Це відкрило можливість використання квантованого холлівського опору, «прив'язаного» до значення $\frac{h}{e^2}$ як еталона опору. Після узагальнення результатів дослідження квантового ефекту Холла в різних метрологічних лабораторіях, МБМВ розробив технічну інструкцію, при виконанні якої можна бути впевненими, що значення відтворюваного опору буде незалежним від властивостей зразка і експериментальних умов [35].

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

5.2. Міра електричного опору на КЕХ

Міра опору на КЕХ – це установка, яка включає необхідні пристрої для відтворення квантового ефекту Холла, тобто «холлівського» опору (одного або двох значень), який «народжується» у кріогенному середовищі, і передачі його розміру класичним мірам опору. Таким чином, вона містить у собі кріостат (герметизована ємність з рідким гелієм – посудина Дьюара), у якому в спеціальному кріозонді знаходиться холлівська структура, надпровідний магніт, що створює магнітне поле, а також пристрій для передачі розміру холлівського опору до класичної міри опору (рис. 5.8).

Передача опору від холлівської міри має ряд особливостей порівняно з вимірюванням опору звичайної міри. Головна з них полягає в тому, що, на відміну від звичайних мір опору, перехідний опір між струмовими і потенційними клемми зразка в режимі квантового ефекту Холла не малий і завжди близький до номінального значення відтворюваного опору. З цієї причини неможливе проведення вимірювань з використанням подвійних мостів опору, які широко застосовуються у складі національних еталонів. Тому в перших експериментах з квантовим ефектом Холла застосовувалися потенціометричні схеми порівняння опору зразка з близькою за значенням мірою опору стандартного ряду R_e . Струм пропускається послідовно через зразок і порівнюваний з ним опір, а падіння напруги на них по черзі вимірюється тим самим приладом (рис. 5.9).

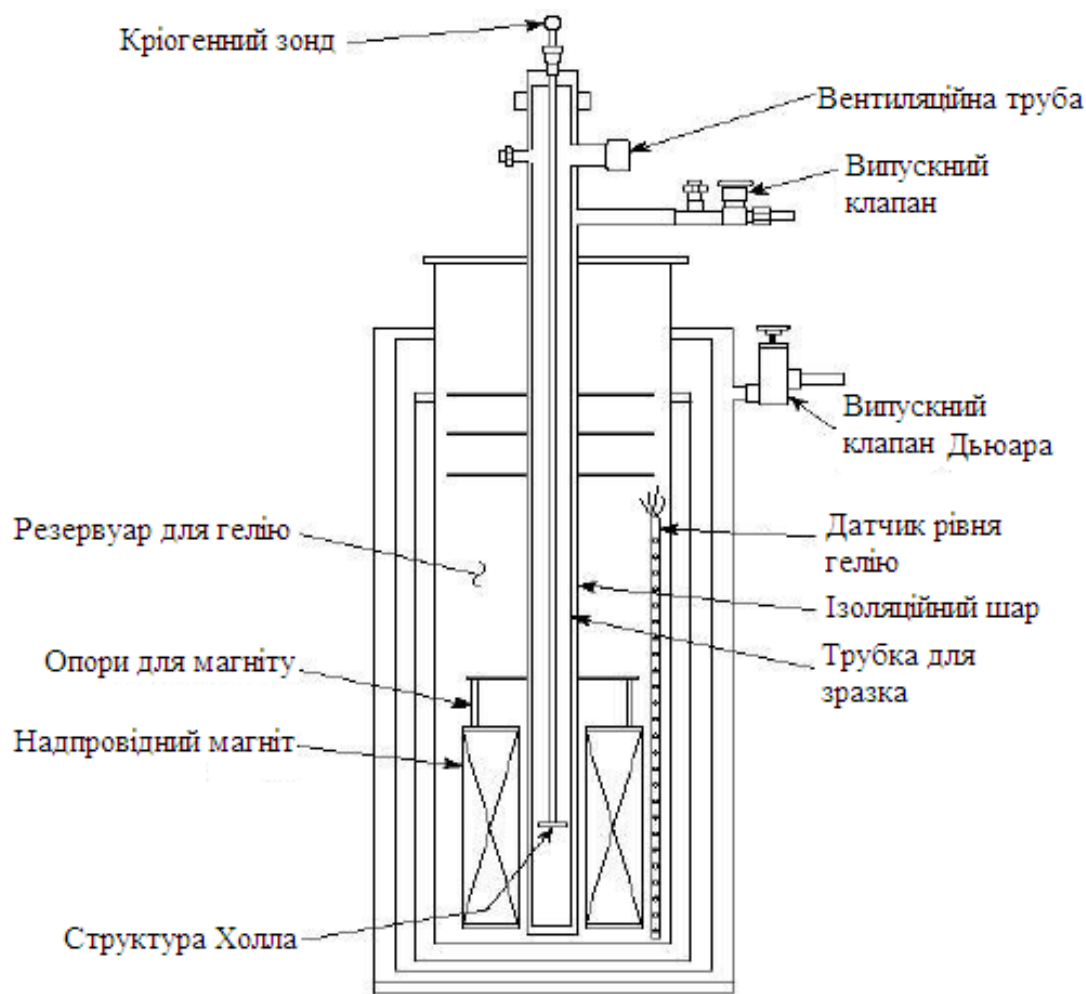


Рисунок 5.8 – Схема кріостата з надпровідним магнітом і зондом

Важливим елементом цієї апаратури є використання в ній *надпровідного магніту*, тобто електромагніту, який працює в режимі надпровідного струму в його обмотках. Це дозволяє одержати сильне і стабільне магнітне поле.

Наведемо деякі відомості про надпровідний магніт. Умови надпровідності: $T < T_{кр}$, $I < I_{кр}$, $H < H_{кр}$, тобто температура, струм і магнітна індукція мають бути нижче критичних значень для матеріалів, які використовуються в обмотках.

Як правило, в обмотках використовуються такі сплави:

- ніобій – цирконій ($T_{кр} = 10,5 \text{ K}$);
- ніобій – титан ($T_{кр} = 9,8 \text{ K}$);
- ніобій – олово ($T_{кр} = 18,1 \text{ K}$).

Основним результатом використання надпровідного магніту є одержання сильного (завдяки ефекту надпровідності) і стабільного (завдяки ефекту Мейснера) магнітного поля.

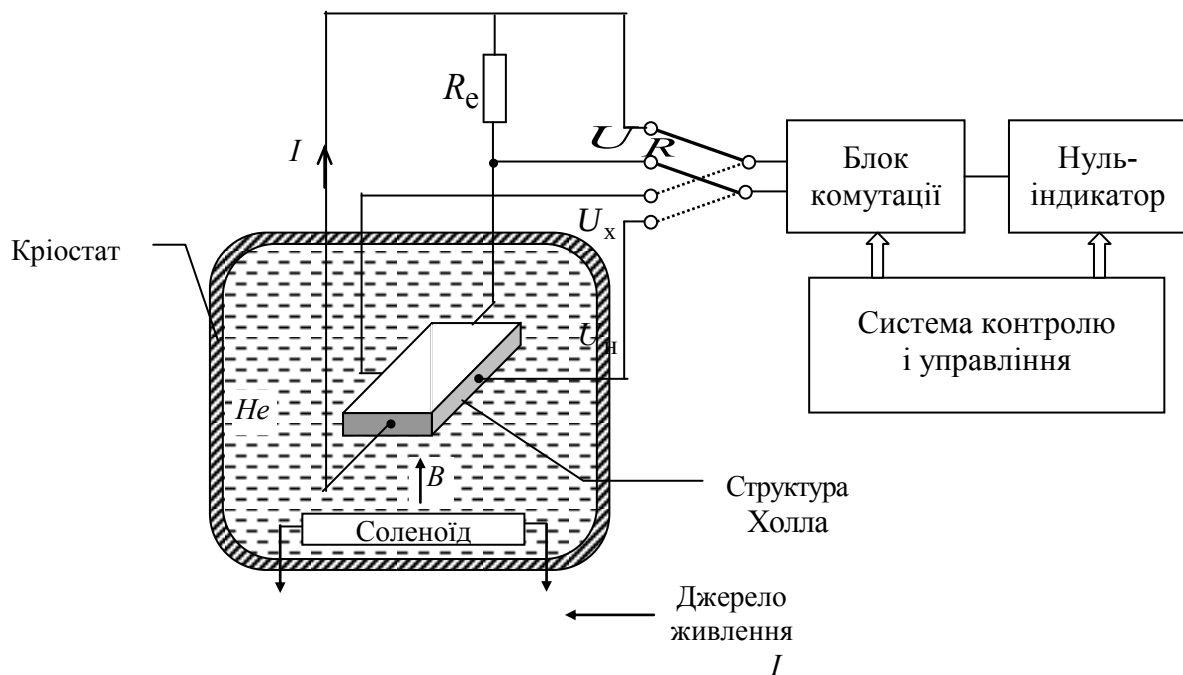


Рисунок 5.9 – Схема передачі холлівського опору

У таких схемах основними джерелами похибок (невизначеностей) є нестабільність вимірювального струму і шуми вимірювального приладу. Крім того, при значній різниці порівнюваних опорів вагомий внесок у невизначеність додає нелінійність вимірювального приладу. Тому пряме порівняння потенціометричним методом квантованого опору (який зазвичай вимірюється на плато № 2, $R_H = 1206,4035 \text{ Ом}$) з мірою найближчого стандартного десяткового номіналу $10\,000 \text{ Ом}$ з відносною невизначеністю в кілька одиниць на 10^{-8} можливе тільки в тому випадку, якщо відносна нелінійність вимірювального приладу не перевищує 10^{-7} .

Альтернативою потенціометричному методу є використання струмового моста з індукційним компаратором постійних струмів (рис. 5.10).

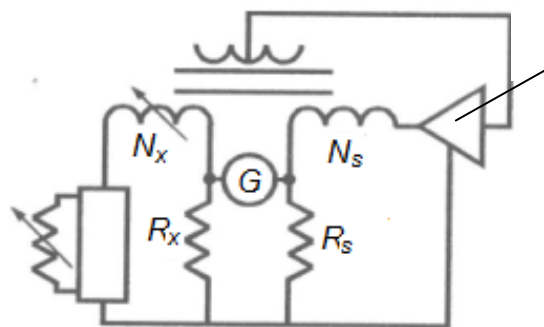


Рисунок 5.10 – Схема моста з компаратором постійного струму

Компаратор струмів являє собою пристрій, який порівнює струми, що течуть у плечах моста, і підтримує задане певне відношення між ними. Порівнювані міри з опорами R_x та R_s вмикаються у плечі моста, а струми, що течуть через них, проходять також і через індуктивно пов'язані котушки з кількостями витків N_s і N_x відповідно, магнітні поля яких спрямовані назустріч один одному. За допомогою датчика магнітного поля і підсилювача зворотного зв'язку, що регулює струм в одному з плечей моста, сумарне значення магнітного поля котушок підтримується рівним нулю [20].

В даний час в еталонних установках на основі квантового ефекту Холла використовуються два типи компараторів постійного струму. Перший тип розглянуто вище. Другий тип – це кріогенний компаратор постійного струму (позначимо ССС), що працює при температурі рідкого гелію.

В основі ССС лежить закон Ампера і ідеальний діамagnetизм надпровідників (ефект Мейснера). Якщо в надпровідну трубку помістити два провідника зі струмами I_1 і I_2 , то на внутрішній поверхні надпровідника індукується надструм I , який переходить на зовнішню поверхню таким чином, щоб підтримувати нульову індукцію магнітного поля B у стінці трубки (рис. 5.11).

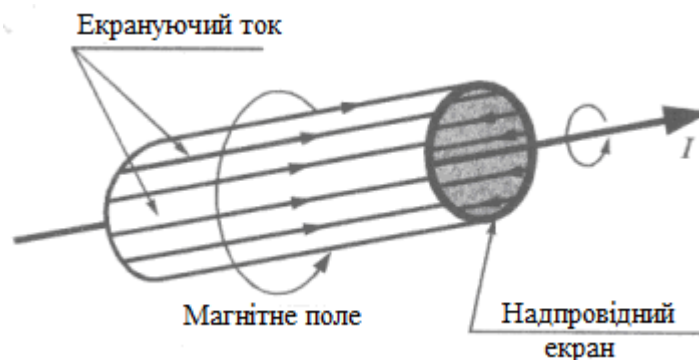


Рисунок 5.11 – Розподіл наведеного струму на поверхні надпровідної трубки

Застосовуючи закон Ампера до замкненого контуру в об'ємі, отримуємо

$$\oint B dt = 0 = \mu_0 (I_1 + I_2 - I),$$

звідки виходить рівність струмів

$$I = I_1 + I_2. \quad (5.1)$$

Для трубки, яка містить N_1 і N_2 витків зі струмами відповідно I_1 і I_2 , рівність (5.1) набуває вигляду

$$I = N_1 I_1 + N_2 I_2. \quad (5.2)$$

Рівність (5.2) справедлива незалежно від положення провідників у трубці – це основна причина високої точності ССС. На практиці ССС містить

дві обмотки з кількостями витків N_1 і N_2 , через які пропускаються струми у протилежних напрямках. Ці обмотки поміщені у надпровідний тор, чий край перекриваються без електричного контакту один з одним, на довжині, достатній для усунення крайових ефектів, що порушують рівність струмів.

Зміни магнітного потоку, створюваного надструмом, детектуються НКВІД, вихідний сигнал якого управляє джерелом одного з струмів. Таким чином, створюється зворотний зв'язок, що підтримує нульове значення надструму:

$$N_1 I_1 \dots N_2 I_2 = 0.$$

Компаратор ССС з'єднується з джерелом двох постійних струмів I_1 і I_2 , які протікають через резистори R_1 і R_2 , що порівнюються. Дія ССС полягає у зміні частини струму I_2 так, щоб магнітне поле підтримувалося рівним нулю. Зазвичай в конструкцію додають і третю обмотку з кількістю витків N_a , щоб, маніпулюючи відведеною в неї малою частиною струму, встановити баланс і за напругою на порівнюваних резисторах. У результаті відношення опорів визначається виразом $R_1/R_2 = N_1/N_2[1 + (N_a/N_2)\epsilon]$, де ϵ вимірюється окремо.

Невизначеність порівняння опорів за допомогою ССС досягає декількох одиниць на 10^{-9} , що робить цей метод найбільш точним у даний час. Проте спостерігається стрімкий прогрес у підвищенні точності компараторів струму, що працюють при кімнатній температурі; невизначеність результатів вимірювань за допомогою них доведена вже до 10^{-8} і менше.

Ще донедавна установки, які реалізовували КЕХ, були унікальними виробами, якими володіли лише найбільш розвинені країни. На цей час вже щонайменше дві фірми (Measurement International та Criogenic) випускають на замовлення повний комплект холлівських мір для первинних еталонів одиниці опору.

Наведемо дані про міру 6800 A Measurement International [36]. Вона складається з трьох основних частин:

- еталонна система, яка містить криогенний зонд, холлівську структуру (рис. 5.12), вимірювальне обладнання;
- криогенна установка, що містить ємність для рідкого гелію (посудину Дьюара) і надпровідний магніт з індукцією до 9 Тл;
- міст-компаратор (працює при кімнатній температурі), який забезпечує передавання холлівського опору ($R = 12,9064035$ кОм) мірам опору 1 кОм і 10 кОм з похибкою не більше $2 \cdot 10^{-8}$. Зовнішній вигляд міри 6800 А наведено на рис. 5.13.

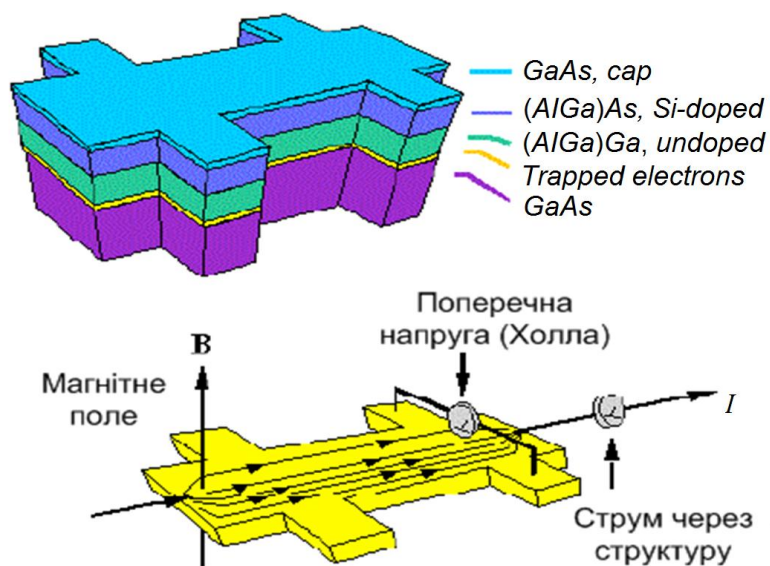


Рисунок 5.12 – Холлівська структура міри 6800 А



Рисунок 5.13 – Зовнішній вигляд міри Холла 6800 А

Фірма CrioGenic випускає аналогічну холлівську міру QHR 2000, яка відрізняється використанням кріогенного компаратора струмів (ССС) і забезпечує передавання опору Холла $R_x = 12,9064035$ кОм мірі опору 100 Ом з похибкою $1 \cdot 10^{-8}$.

5.3. Структурна схема еталона одиниці електричного опору на КЕХ

Основним пристроєм еталона є установка (міра) для відтворення квантового ефекту Холла. Крім неї первинний еталон містить у собі (рис. 5.13):

- *«елітну» групу зберігання* одиниці електричного опору, яка складається з прецизійних мір електричного опору одного чи декількох номіналів і перехідних мір, що дозволяють проводити взаємні звірення мір різних номіналів, а також термостата;
- *систему передавання*, яка складається з кількох мостів-компараторів опору для передачі розміру одиниці між пристроями первинного еталона і підпорядкованим еталоном;
- *набір «робочих» мір* для передачі розміру одиниці в діапазоні від 10^{-6} до 10^{12} Ом.

Крім цих метрологічних пристроїв до складу еталона входять системи програмування і обчислення, термостатування, якісного електроживлення, екранування і заземлення. Спрощена структурна схема первинного еталона одиниці електричного опору наведена на рис. 5.14.

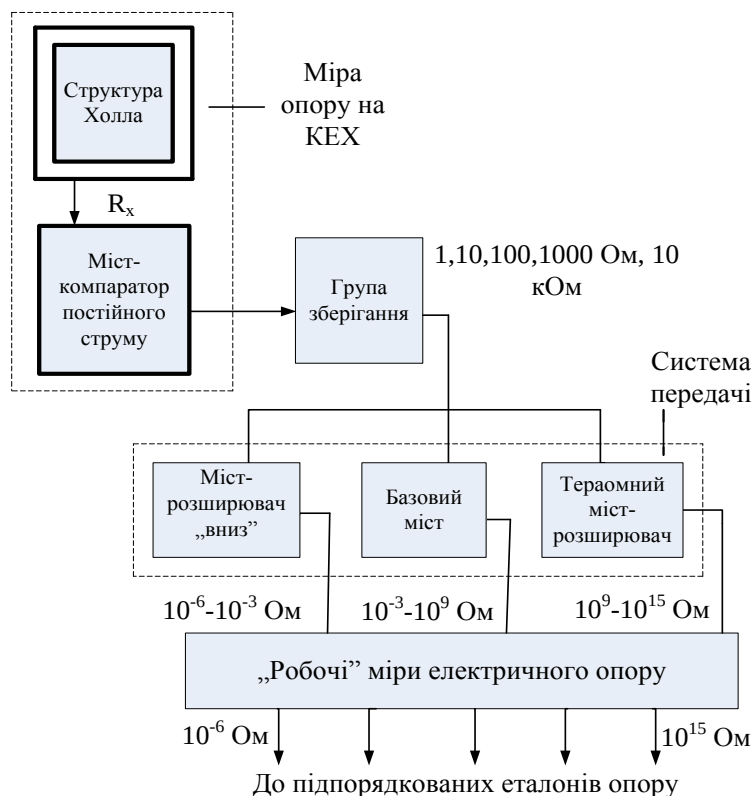


Рисунок 5.14 – Структурна схема первинного еталона одиниці електричного опору

Основним джерелом похибки (невизначеності) відтворення одиниці еталоном є похибка передавання розміру одиниці від холлівської структури до класичних мір опору. Крім того, сумарна похибка включає різні складові залежно від обраного методу передачі, типу компаратора опору, а також ланцюга передачі до різних ділянок діапазону опору.

номінальні значення відтвореного опору, Ом.....12906,4035;

діапазон, у який передається розмір одиниці, Ом..від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{15}$;

НСП відтворення ($P = 0,99$)..... $(1 - 5) \cdot 10^{-8}$;

СКВ випадкової похибки..... $(1-2) \cdot 10^{-8}$

(стандартна невизначеність – від $2 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-7}$).

Первинний еталон електричного опору України створювався у два етапи. Спочатку була створена апаратура, яка могла зберігати розмір «холлівської» одиниці опору, одержаної зовні (зокрема, від ПТБ, Німеччина).

- апаратуру зберігання одиниці опору, що складається з груп мір опору 1 та 100 Ом і перехідної міри 11·10 Ом;

- 116

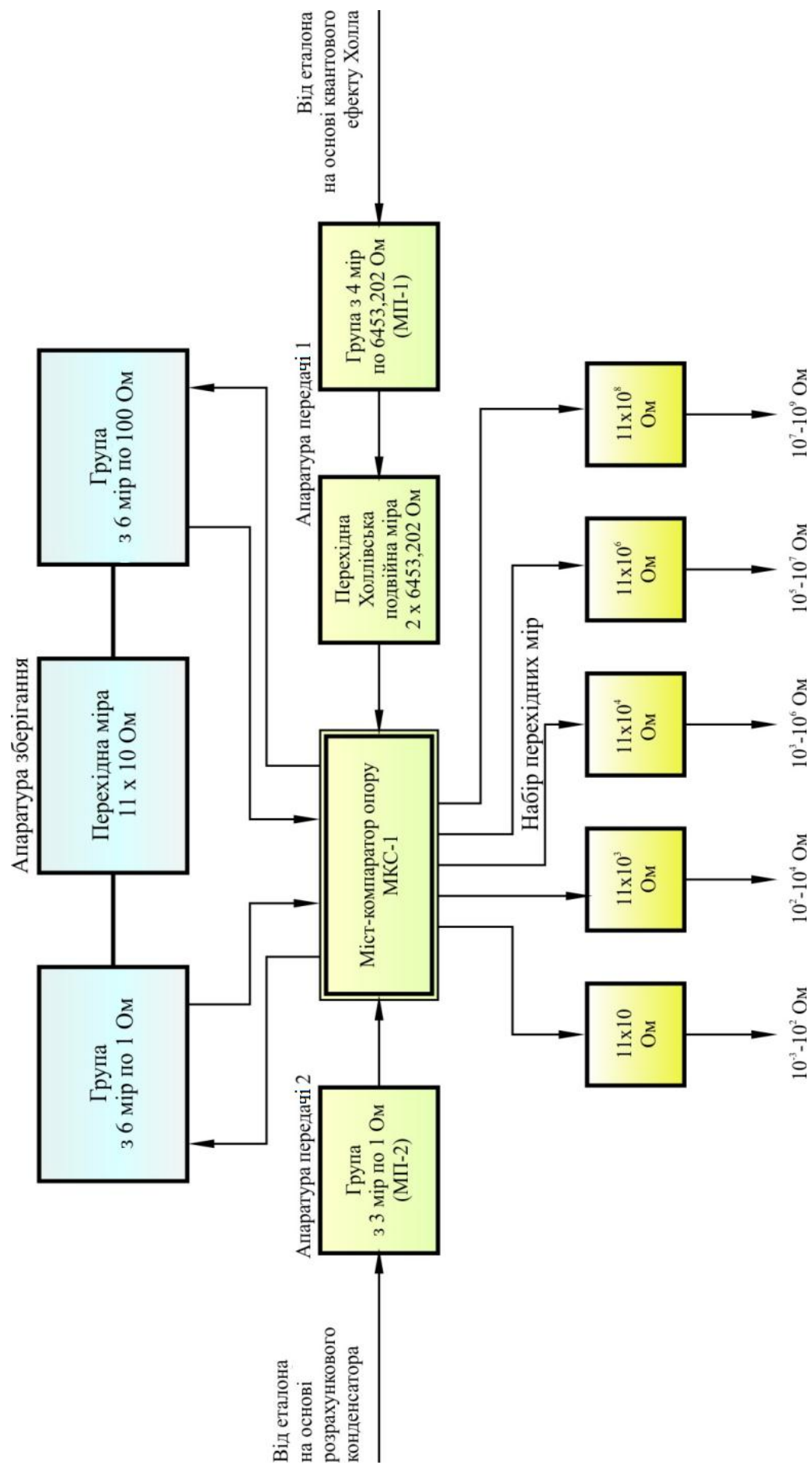


Рисунок 5.15 – Структурна схема першої черги еталона

У 2016 р. було створено другу чергу еталона, а саме, до його складу було уведено установку для відтворення розміру ома – міру Холла 6800 А (див. рис. 5.13), а також ряд сучасних пристроїв. Це дозволило зробити еталон дійсно первинним (який не тільки зберігає, а й відтворює розмір одиниці), а також суттєво підвищити його метрологічні характеристики.

Наведемо основні з них:

- невиключена систематична похибка $5 \cdot 10^{-8}$;
- середньоквадратичне відхилення, не більше $3 \cdot 10^{-8}$;
- стандартна невизначеність $6 \cdot 10^{-8}$;
- діапазон опору від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{12}$.

5.5. Квантовий ефект Холла і відтворення параметрів

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

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

$$R = \frac{1}{\omega C} = \omega L. \quad (5.3)$$

Таким чином, знаючи один з параметрів R , L , C і частоту f , можна визначити інші параметри за виразами:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{R}{\omega}; \quad (5.4)$$

$$C = \frac{1}{R\omega} = \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (5.5)$$

У недалекому минулому, до відкриття квантового ефекту Холла (КЕХ), кожний з цих імпедансів по чергово слугував опорною точкою для відтворення інших. Спочатку це був розрахунковий резистор R_p , потім розрахункова індуктивність L_p , нарешті, розрахункова ємність C_p [35].

5.5.1. Розрахунковий конденсатор

Саме за допомогою розрахункового конденсатора, який мав спеціальну симетричну конструкцію з кількома циліндричними електродами, було досягнуто найменшу невизначеність відтворення одиниці імпедансу. В 1956 р. австралійськими вченими Томсоном і Лампардом був розроблений розрахунковий конденсатор (РК), який забезпечив невизначеність 10^{-7} [21,22]. Спочатку лише Національний метрологічний інститут Австралії мав розрахунковий конденсатор, а інститути інших країн калібрували в ньому свої еталони опору кожні кілька років. Пізніше було виготовлено кілька РК у різних країнах, а невизначеність була зменшена до $5 \cdot 10^{-8}$, але значні зусилля з їх виготовлення заважали їх розповсюдженню.

Докладно основи методики відтворення ємності за допомогою розрахункового конденсатора викладено у [21,22], де показано, що повна «перехресна» ємність ідеального розрахункового конденсатора з довжиною циліндра (електродів) l дорівнює

$$C = \bar{C}l = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l, \quad (5.6)$$

а її приріст

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l. \quad (5.7)$$

Із цих формул видно, що середнє значення питомої ємності $\bar{C}$ такого конденсатора є постійним. Відхилення від симетрії потребує поправкових членів другого порядку малості, настільки ж мало впливають на $\bar{C}$ параметри температурного поля. Важливою позитивною властивістю розрахункового конденсатора Томсона – Лампарда є те, що для визначення ємності потрібне тільки вимірювання довжини l , яке можна виконати з високою точністю. Недолік його – мала ємність (близько 1 пФ на 50 см довжини), що вимагає побудови спеціальних масштабних перетворювачів для передачі розміру одиниці в область більших ємностей.

Існує багато варіантів конструкції конденсатора з перехресними ємностями, але оптимальною виявилася конфігурація з чотирьох паралельних стрижнів, симетрично розташованих у заземленому круговому циліндрі (рис. 5.16), – це конденсатор В. Клотьє.

Вимірювання довжини електродів l здійснюється за допомогою спеціальної інтерферометричної апаратури, що встановлюється разом з розрахунковим конденсатором в одному вакуумному блоці.

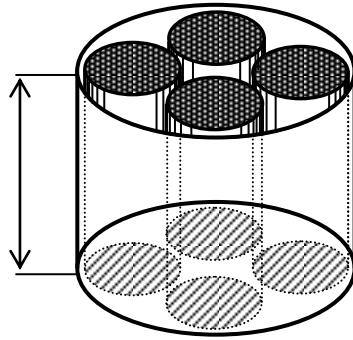


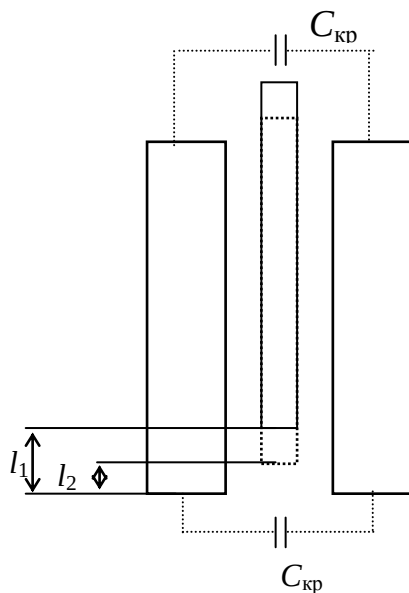
Рисунок 5.16 – Конструкція розрахункового конденсатора В. Клотье

Джерелом домінуючої похибки розрахунку еталонної ємності є наявність крайових ефектів, що призводять до утворення ємностей між торцевими поверхнями кожної пари циліндрів $C_{кр}$ (рис.5.17, а).

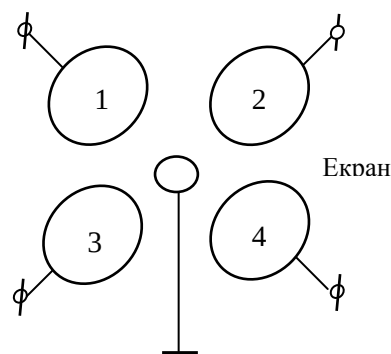
З урахуванням крайового ефекту

$$C = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} l_0 + C_{кр} \cdot \pi.$$

Для підвищення точності розрахунку необхідно виключити вплив цих ємностей. Із цією метою визначають не саму середню ємність C , а її приріст ΔC . Для цього у простір між електродами вводиться заземлений екран циліндричної форми (рис. 5.17, б).



а



б

Рисунок 5.17 – Конденсатор В. Клотье:
а) боковий вид; б) вид зверху

Тоді

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} l_1 + C_{\text{кр}} - \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} l_2 - C_{\text{кр}} = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l,$$

де Δl – зміна ефективної довжини електродів.

Відстань Δl , на яку переміщується екран униз, вимірюється інтерферометром.

5.5.2. Відтворення одиниць активного опору і індуктивності за допомогою розрахункового конденсатора

До відкриття Клітцингом квантового ефекту Холла розрахунковий конденсатор був найбільш точним вихідним пристроєм для відтворення не тільки ємності, але й активного опору, і індуктивності за рівняннями (5.3 – 5.5). Спрощену схему реалізації цих рівнянь наведено на рис. 5.18 [38].

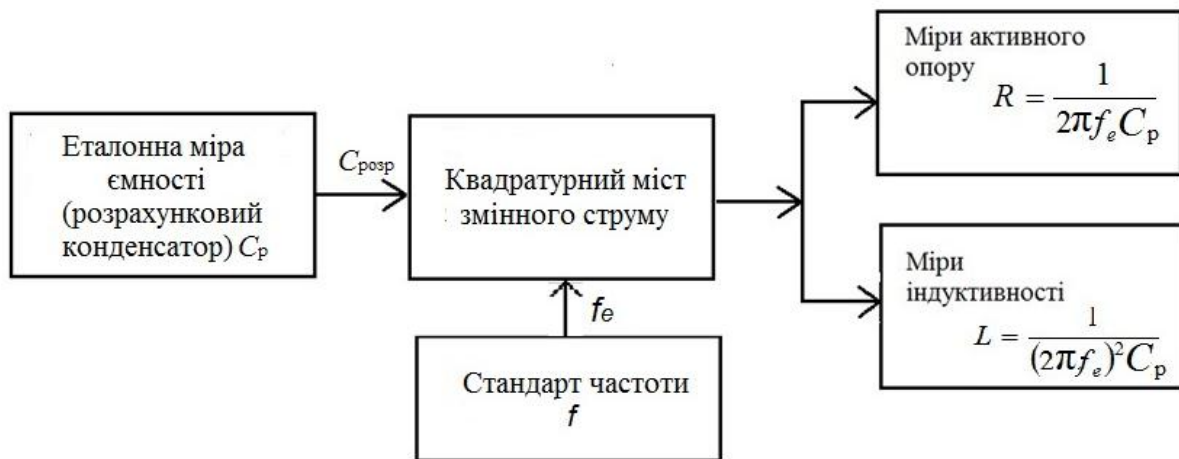


Рисунок 5.18 – Схема калібрування мір активного опору і індуктивності за РК

Але на практиці встановити ці рівності в необхідних значеннях R , C і L виявилось далеко не просто. Для цього потрібні мости-компаратори двох типів: масштабуючі і квадратурні, а також стандарт частоти НЧ-діапазона, прецизійні міри R , L , C різних кратностей тощо.

Оскільки в Україні робота з РК не проводилась, наведемо розроблене в РТВ (Німеччина) вимірювальне коло від розрахункового конденсатора 1 пФ (усі відомі конструкції РК здатні відтворювати ємність не більше 1 пФ) до опору 1 Ом (рис. 5.19), з якого видно, скільки кроків і зусиль необхідно для цього витратити [35]. Коло виконано із пар еталонних пристроїв, послідовно приєднаних до квадратурного моста з масштабуючим

коефіцієнтом 10:1, а також кріогенного компаратора струму (ССС) – моста з точним коефіцієнтом перетворення струму.

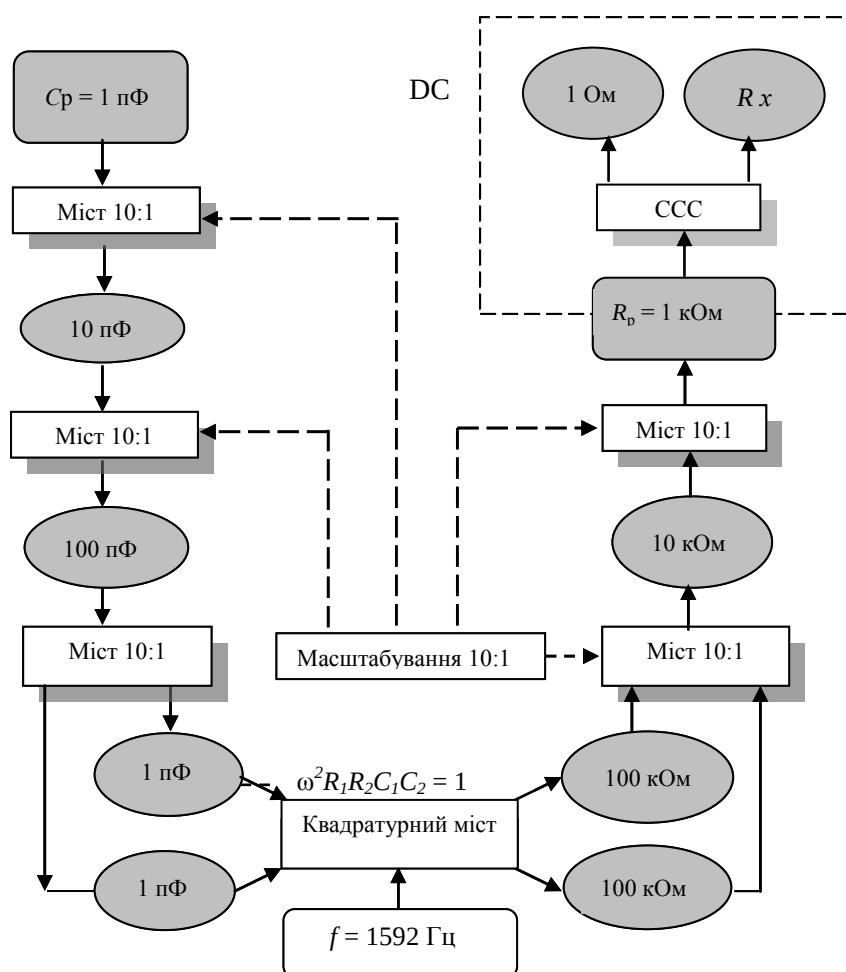


Рисунок 5.19 – Вимірювальне коло від РК до еталонної міри опору 1 Ом

5.5.3. Відтворення ємності і індуктивності за допомогою холлівської міри опору на постійному струмі

Прилад, що реалізує квантовий ефект Холла, став майже ідеальним природним еталоном електричного опору, а КЕХ, після численних експериментів і випробувань, був у 1988 р. рекомендований МКМВ для первинного відтворення відповідної одиниці – ома.

Спрощену схему відтворення (калібрування) одиниць ємності і індуктивності з використанням КЕХ наведено на рис. 5.20 [38].

Наведемо цей шлях відтворення одиниць також на прикладі РТВ.

Розроблене у РТВ [35] вимірювальне коло від міри холлівського опору $12,9 \text{ кОм}$ до ємності 10 пФ наведено на рис. 5.21 (прилад КЕХ працює на постійному струмі). Використання цієї схеми у порівнянні зі схемою на РК

дозволило зменшити похибку відтворення параметрів імпедансу приблизно на порядок, а головне – побудувати систему відтворення одиниць не на артефакті, який в силу своєї природи не може бути абсолютно стабільним, а на квантовому ефекті і фундаментальних сталих.



Рисунок 5.20 – Схема калібрування мір ємності і індуктивності за КЕХ

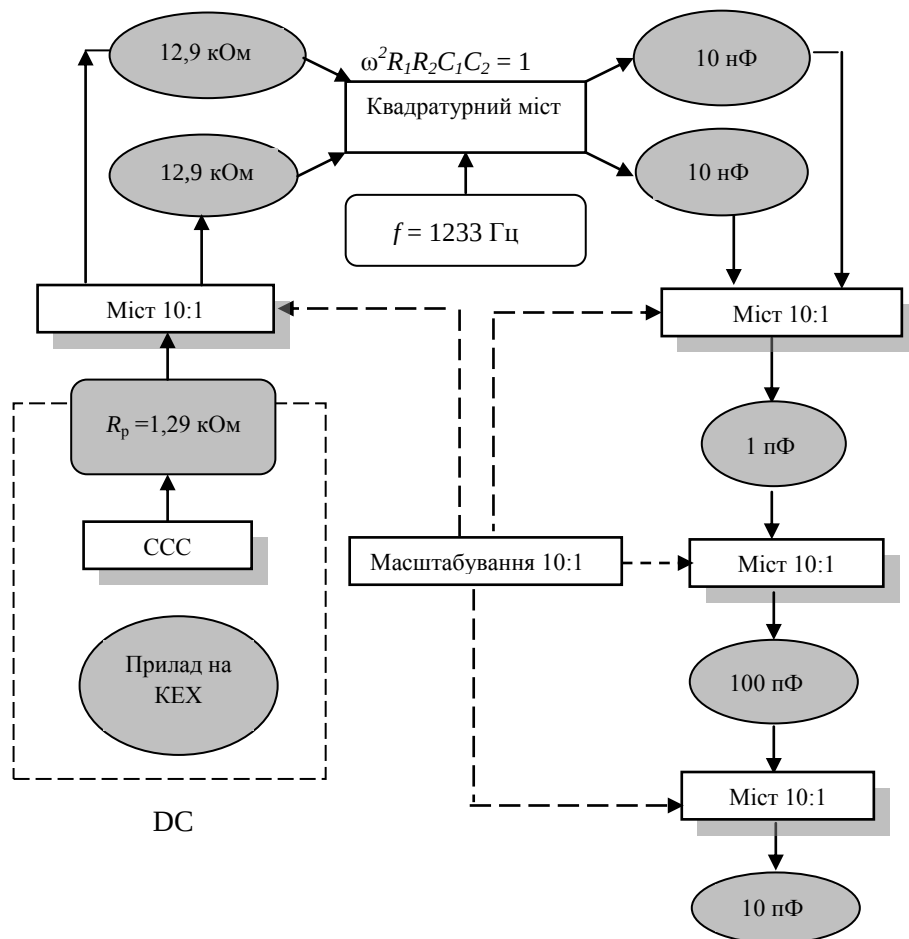


Рисунок 5.21 – Вимірювальне коло від міри на КЕХ до еталонного конденсатора 10 пФ (прилад на КЕХ працює на постійному струмі)

Тим не менше, вимірювальна схема все ще залишалась досить складною. Зокрема, вона потребує прецизійної міри опору – резистора $R = 1,29 \text{ кОм}$ з нормованою частотною залежністю [35].

5.5.4. Використання квантового ефекту Холла на змінному струмі

Успіхи у використанні КЕХ для відтворення одиниці електричного опору, а також розробка «маршруту» (електричного кола) для калібрування еталонної електричної ємності сприяли подальшим дослідженням у цій області.

У 1992 р. Дж. Мельхер з колегами у РТВ запропонували реалізувати КЕХ на змінному струмі з частотою, необхідною для калібрування ємності (і індуктивності) [35]. Логіка цієї пропозиції зрозуміла: «внутрішня» частота приладів на КЕХ визначається циклотронною частотою обертання електронів навколо магнітних силових ліній у двовимірному електронному газі холлівської структури, що складає сотні гігагерц. Це означає, що у приладі на КЕХ не повинно бути ніякої частотної залежності в діапазоні звукових частот, оскільки для нього струм на таких частотах є фактично квазіпостійним.

Багато Національних метрологічних інститутів почали проводити роботи з використання КЕХ на змінному струмі, але швидко з'явилися перші розчарування: було виявлено, що плато характеристики КЕХ на змінному струмі дещо викривлені або «зашумлені», не такі плоскі, як при постійному струмі, а також дещо зміщені за опором у порівнянні з КЕХ на постійному струмі. Було також виявлено, що і викривлення, і зміщення збільшуються пропорційно частоті і складають кілька одиниць 10^{-7} на 1 кГц. Ці ефекти були віднесені на рахунок ємності у квантовому пристрої для реалізації КЕХ. Через це більшість НМІ припинили свої роботи в цьому напрямку, деякі досягли зменшення невизначеності (похибки) до 10^{-8} на 1 кГц, яка була прийнятною для практичних цілей, але не для справжнього квантового еталона [35].

Так продовжувалось близько 10 років, поки В. Р. Кіббл, що співробітничав з РТВ, не знайшов методичних недоліків у вимірюванні імпедансу і не запропонував відповідної техніки екранування. Завдяки цьому невизначеності знизились до $1 \cdot 10^{-9}$ на 1 кГц, що вже не поступається точності, досягнутої за допомогою КЕХ на постійному струмі [35].

Розроблене в РТВ вимірювальне коло показано на рис. 5.22.

Воно набагато простіше від маршруту на постійному струмі i , тим паче, від маршруту з розрахунковим конденсатором. Суттєвою перевагою використання КЕХ на змінному струмі у порівнянні з постійним струмом є відсутність потреби в атестованому резисторі 1,29 кОм.

Перевага використання КЕХ на змінному струмі полягає також у можливості калібрування мір ємності різних номінальних значень на різних частотах.

Завдяки низькому тепловому шуму кріогенного приладу на КЕХ коло вимірювання на змінному струмі може бути виконано таким чином, що кожний з двох еталонів ємності, які використовуються у вимірюваннях, працює при тій самій напрузі (рис. 5.22) [35]. Це усуває необхідність трудомісткого визначення та коригування залежності еталонів ємності від напруги, яка необхідна для проходження маршруту. І навпаки, залежний від напруги прилад КЕХ змінного струму може бути використаний з метою простого визначення впливу напруги на еталони ємності.

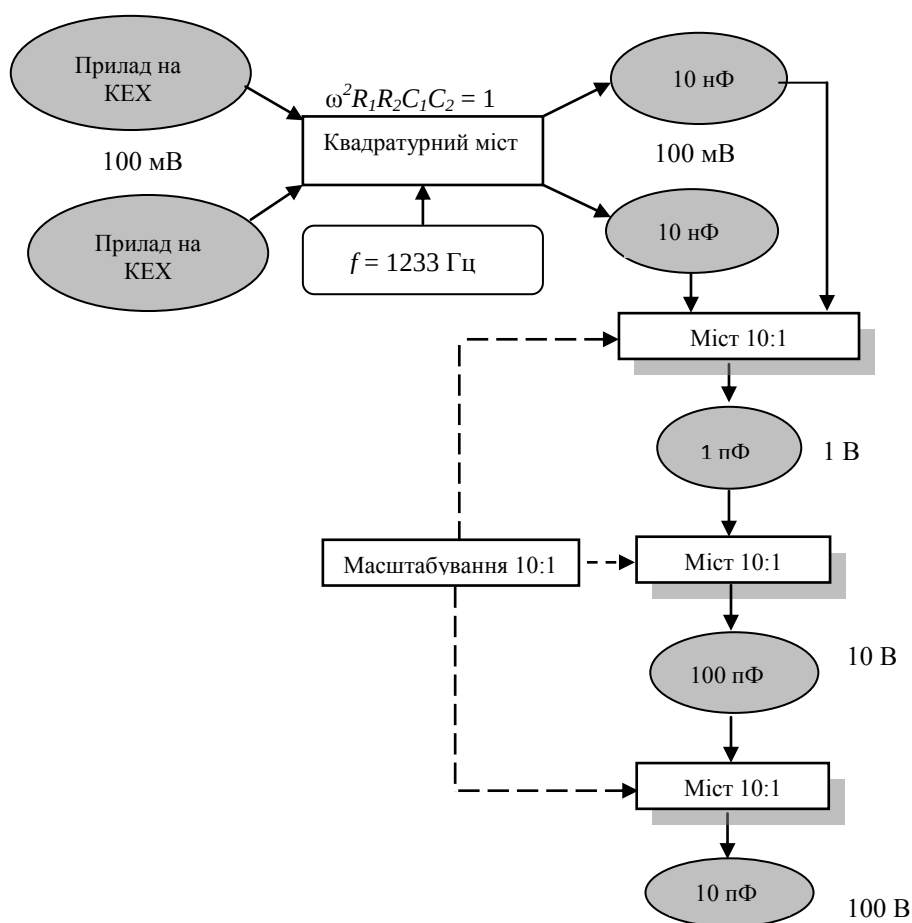


Рисунок 5.22 – Вимірювальне коло від холлівської міри опору на змінному струмі до ємності 10 пФ

Нарешті, реалізація одиниці ємності від КЕХ на змінному струмі є важливою для експерименту, відомого як «випробування квантового метрологічного трикутника» [20; 35]. Кріогенний конденсатор із ємністю C , відкаліброваною відносно сталої фон Клітцинга R_K , заряджається за допомогою «насоса одноелектронного тунелювання» (SET) до відомої кількості електронів (заряду $Q = Nq$), і отримана напруга U на конденсаторі вимірюється відносно сталої Джозефсона K_J . Ураховуючи рівність $Q = CU$, можна проводити випробування сумісності квантового трикутника через відношення між фундаментальними сталими $R_K = h/e^2$, $q = e$ та $K_J = 2e/h$.

Таким чином, використання КЕХ у порівнянні з розрахунковим конденсатором дозволило підняти точність і надійність відтворення одиниць імпедансу (завдяки використанню стабільного фізичного ефекту замість артефакту), а використання КЕХ на змінному струмі – спростити процедуру і технологію відтворення одиниць у порівнянні з КЕХ на постійному струмі, а також одержати нові функціональні можливості.

5.5.5. Стан в Україні

В Україні роботи зі створення національної еталонної бази почалися у 1993 р., коли час розрахункового конденсатора як вихідного еталона імпедансу вже минув. Тому з самого початку в електричній метрології було обрано курс на квантові еталони на ефектах Джозефсона (вольта) і Холла (ома).

На початку цього століття було створено первинні еталони одиниць ємності і індуктивності. Структурна схема першого з них наведена на рис. 5.23, це еталон індуктивності, близький до нього за принципом побудови.

У цих еталонах використовуються сучасні прецизійні міри R , L , C , масштабуючі і квадратурні мости-компаратори, інші необхідні пристрої. Метрологічні характеристики цих еталонів наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Метрологічні характеристики еталону електричної ємності та еталону електричної індуктивності

Характеристика	Еталон електричної ємності	Еталон електричної індуктивності
Діапазон відтворення одиниць	від $1 \cdot 10^{-3}$ пФ до 100 мкФ	від $1 \cdot 10^{-6}$ до 10 Гн
НСП	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$
СКВ	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Стандартна невизначеність	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$

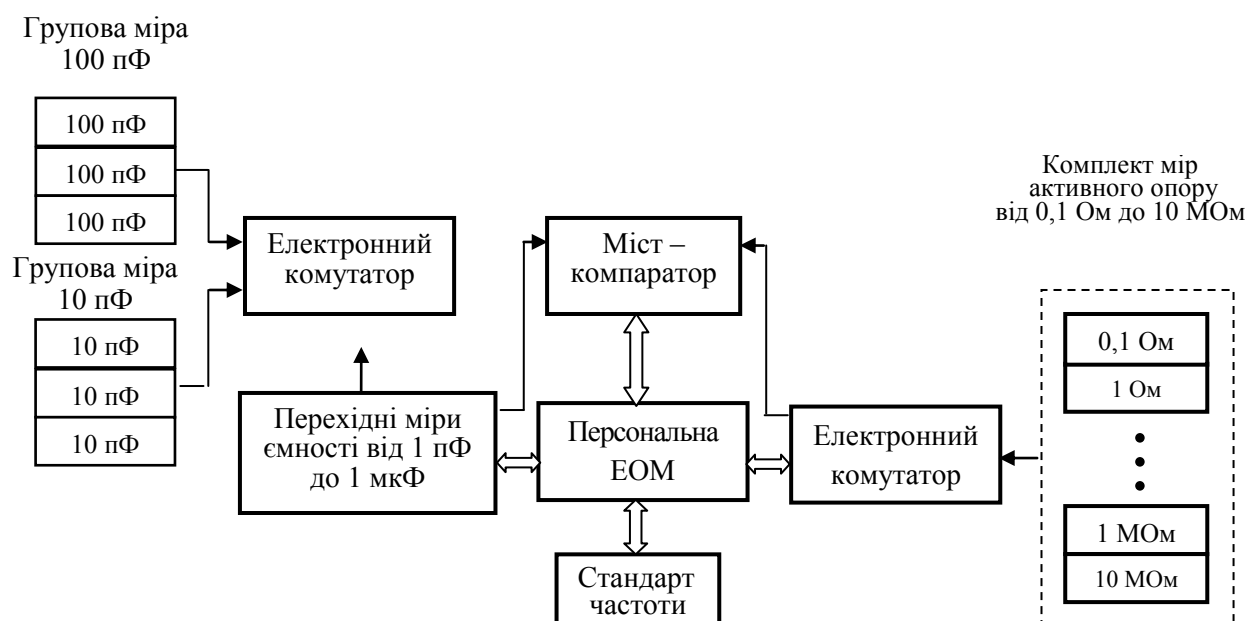


Рисунок 5.23 – Структурна схема первинного еталона електричної ємності України

Зазначимо, що показники точності цих еталонів визначаються вихідними мірами активного опору і можуть бути поліпшені шляхом їх калібрування за квантовим ефектом Холла, тобто з введенням міри на КЕХ до складу первинного еталона активного опору.

5.6. Перспектива розвитку – квантовий ефект Холла на графені

Незважаючи на успіхи в освоєнні промислового випуску квантових мір опору, про які йшла мова вище, КЕХ все ще залишається достатньо складною технологією і є важкодоступним для багатьох НМІ.

Основні труднощі цієї технології: необхідність «жорсткого» криогенного режиму (температури близько 1 К) з використанням дорогого рідкого гелію і відповідної інфраструктури; необхідність сильного магнітного поля (8 Тл і більше).

Прогнозується, що принципово нові можливості в реалізації КЕХ може надати так званий «графен» – наноматеріал, який являє собою найтонкіший матеріал у світі (товщиною в один атом вуглецю). Графен не тільки надтонкий матеріал, він на порядок міцніший за сталь і при кімнатній температурі проводить електричний струм краще від будь-якого з відомих матеріалів. Дві характерні риси, що обумовлюють унікальні властивості графену – це

високий опір молекулярної структури графену виникаючим дефектам, а також надзвичайно висока швидкість електронів, що переносять електричний заряд, – значно вище, ніж у металах і надпровідниках.

Вважається, що можливими сферами використання графену стануть супершвидкі комп'ютери, сонячні батареї, сотові телефони, плоскі дисплеї з холодними катодами тощо.

Одним із використань графену припускається створення на його основі двовимірної структури для реалізації КЕХ. Передбачається, що його використання дозволить реалізувати КЕХ при значно вищих температурах, ніж у відомих структурах (навіть при кімнатних, але при магнітних полях близько 20 Тл).

Інші дослідження показують, що можна очікувати реалізацію КЕХ при низьких температурах, але значно нижчих рівнях магнітної індукції (близько 3 Тл). Це значно спростить реалізацію цього ефекту і розширить сферу його застосування. Крім того, надзвичайно висока внутрішня циклотронна частота структур на графені значно спрощує їх використання в КЕХ на змінному струмі (про що йшла мова в підрозд. 5.5).

Додамо, що з 2015 р. відкрито міжнародний дослідницький проект (SRT-05) «Метрологія квантового імпедансу із використанням графену», цілями якого є сприяння створенню приладів КЕХ на графенах, працюючих на постійному і змінному струмі, досягнення невизначеності відтворення 10^{-9} при постійному і 10^{-8} при змінному струмі. При цьому прилади повинні працювати при $B < 2$ Тл і температурах приблизно 3–5 К, на частоті до 100 кГц. Також ставиться завдання «значно поліпшити зручність експлуатації відповідних пристроїв за допомогою розробки некріогенної квантової системи калібрування, що базується на КЕХ у графені». Завдання цього проекту показують, яких орієнтовних характеристик можна очікувати від пристроїв на основі графену.

Висновки

- Квантовий ефект Холла (разом з ефектом Джозефсона) був одним із тих фізичних явищ, які докорінно змінили ситуацію в електричній метрології; його визнання в 1988 р. привело до створення практичної системи одиниць в електриці.

- На сьогодні КЕХ є загальновизнаним *референтним* методом відтворення абсолютного значення електричного опору, на основі якого будуються первинні еталони одиниці електричного опору – *ома*.
- Ще донедавна установки, які реалізовували КЕХ, були унікальними виробами, якими володіли лише найбільш розвинені країни. На цей час вже щонайменше дві фірми випускають на замовлення холлівські міри для первинних еталонів одиниці опору, що робить цей ефект більш доступним для метрологічної практики.
- Квантовий ефект Холла (разом з ефектом Джозефсона) застосовується в метрології для відтворення основної одиниці в електриці – ампера, деяких інших одиниць, а також при створенні природного еталона кілограма.
- КЕХ є вихідним методом відтворення інших параметрів електричних кіл – ємності і індуктивності (з використанням квадратурного моста і еталонної частоти).
- Перспективними напрямками розвитку вимірювальних технологій на КЕХ є використання цього ефекту на *змінному струмі*, а також створення відповідних приладів на *графені*.

Контрольні питання

1. Яка фізична суть «звичайного» ефекту Холла?
2. Яка фізична суть квантового ефекту Холла?
3. Що таке МДН-структура?
4. Що таке надпровідний магніт?
5. Що розуміється під «двовимірним електронним газом»?
6. Поясніть спрощену структурну схему міри опору Холла?
7. З яких пристроїв складається еталон опору на КЕХ?
8. Які орієнтовні метрологічні характеристики еталон на КЕХ?
9. Як можна відкалібрувати ємність і індуктивність за допомогою приладу на КЕХ?
10. Що таке квадратурний міст?
11. Що таке графен?
12. Які перспективи мають технології з використанням КЕХ?

Розділ 6

ЕФЕКТ ЯДЕРНОГО МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ (ЯМР) ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВИМІРЮВАННЯ

Ефект ЯМР був першим з макроскопічних квантових ефектів, відкритих у ХХ столітті (1946 р.), які згодом знайшли широке використання в різних галузях науки і техніки, зокрема, в метрології [7,8]. Використання цього ефекту в метрології, поряд з ефектами Джозефсона і Холла, привели до принципових змін у методології електричних і магнітних вимірювань. Автори відкриття Ф. Блох і Б. Парсель за свої дослідження були удостоєні Нобелівської премії з фізики.

Розглянемо суть і метрологічні можливості цього ефекту.

6.1. Фізичні основи ефекту ЯМР

За магнітними властивостями речовини поділяються на три основні групи: феромагнетики, діамагнетики і парамагнетики.

Феромагнетики мають магнітну проникність μ близько одиниці, але під впливом зовнішнього магнітного поля (ЗМП) здатні значно її підвищити до $\mu \gg 1$ і зберігати намагніченість. З феромагнетиків виготовляють постійні магніти.

Діамагнетики – речовини, які під дією ЗМП намагнічуються протилежно магнітному полю ($\mu < 0$), у відсутності ЗМП поля не мають (водень, азот, германій, кремній, вода, інертні гази тощо).

Парамагнетики під дією ЗМП намагнічуються в напрямку ЗМП ($\mu > 0$), до них належать алюміній, кисень, цезій, літій, лужні метали і т.д.

Ядра атомів речовин – діамагнетиків мають магнітний момент μ_i моментом кількості руху p . Відношення цих моментів $\gamma = \mu/p$ носить назву гіромагнітного відношення і є фізичною сталою для даного ядра, значення якої не залежить від зовнішніх умов.

Якщо таку діамагнітну речовину в ампулі помістити в однорідне постійне магнітне поле з індукцією B , то магнітні моменти (диполі) будуть прецесувати навкруги напрямку вектора індукції – аналогічно прецесії гіроскопа у гравітаційному полі Землі.

На основі класичного розгляду можна написати, що момент сил, діючий на диполь, $\overline{M} = |\overline{\mu} \cdot \overline{B}|$, а рівняння руху має вигляд

$$\frac{dp}{dt} = |\overline{\mu} \cdot \overline{B}| = \overline{p} \cdot \overline{\omega}.$$

З цього виразу виходить відоме рівняння для «ларморової» прецесії $\omega = \gamma \cdot B$. При «квантовому» розгляді $M = \overline{\mu} \cdot \overline{B} = h\nu$, $\mu/h = \gamma$, $\nu = \omega = \gamma \cdot B$, тобто одержуємо ідентичні рівняння.

Однією з речовин, яка має властивості діамagnetизму, є водень, ядром атома якого є протон. Він має спін, рівний $1/2$, і у стаціонарному магнітному полі з індукцією B може знаходитись у двох можливих станах: зі спіном, що збігається з напрямом магнітного поля, та зі спіном, протилежним напрямку магнітного поля. Позначимо магнітний момент протона μ_p , тоді різниця енергій цих двох станів дорівнює $2\mu_p B$.

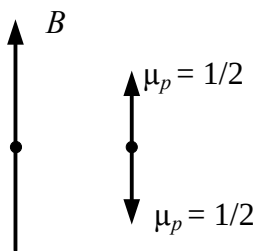


Рисунок 6.1 – Магнітний момент протона

При переході протона зі стану зі спіном, протилежним напрямку магнітного поля, у стан, що збігається з напрямком B , протон випромінює енергію згідно з рівнянням Планка $h\nu = 2\mu_p B$. Тоді частота цього випромінювання дорівнює $\nu = 2\mu_p B / h$. Відношення $2\mu_p / h$ має назву гіромагнітного відношення протона і позначається γ_p .

Якщо у площині, перпендикулярній індукції B , створити високочастотне поле, при збігу частоти цього поля з частотою прецесії протона має місце *ядерний магнітний резонанс*, який супроводжується падінням амплітуди ВЧ-сигналу через поглинання енергії ядрами водню

$$f_{\text{пр}} = f = f_{\text{ямр}}.$$

Схему, за допомогою якої можна фіксувати ефект ЯМР в ядрах водню, наведено на рис.6.2 [39].

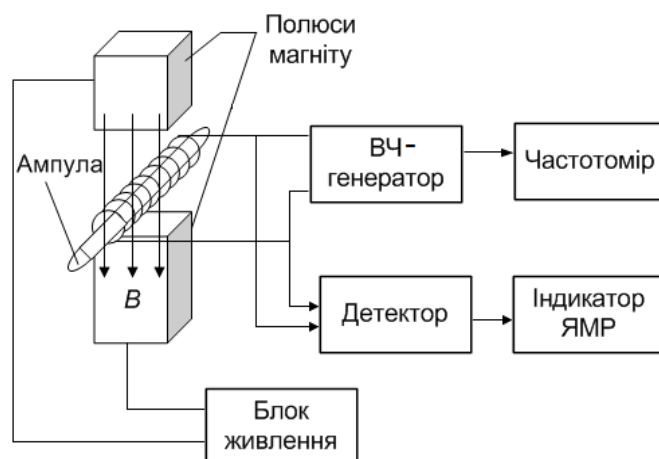


Рисунок 6.2 – Схема реалізації ефекту ЯМР

Використовується резонанс протонів у воді (водному розчині FeCl_3). Розчин знаходиться в ампулі, на якій намотані ВЧ-котушки (див. рис. 6.2). Ампула поміщається в постійне магнітне поле між полюсами електромагніту (у робочому зазорі). Вісь котушки має бути перпендикулярна вектору вимірюваної індукції магнітного поля.

На котушку подається напруга від ВЧ-генератора, внаслідок чого навколо зразка створюється змінне магнітне поле. При збігу частоти ВЧ-генератора з частотою прецесії протонів має місце ЯМР, що супроводжується поглинанням енергії. При цьому ВЧ-напруга на котушці падає, що фіксується через детектор осцилографічним індикатором. Вигляд сигналу ЯМР наведено на рис. 6.3.

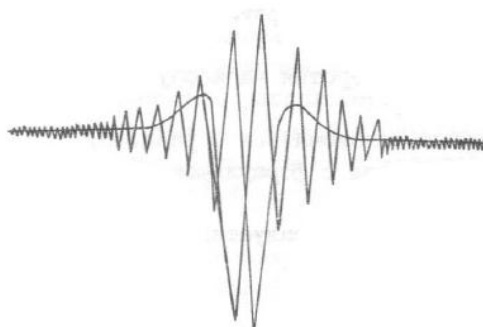


Рисунок 6.3 – ЯМР-сигнал

Частота ВЧ-генератора у момент ЯМР вимірюється електронно-лічильним частотоміром. У цей момент справедлива формула $\nu = 2\pi f / \gamma_p$, на основі якої можуть вирішуватися різні вимірювальні завдання.

Найбільш часто (за критерієм потужності резонансного сигналу) застосовуються резонанси атомів водню (H) (протона), літію (Li) і дейтерію (D). Для вимірювання використовують водні розчини парамагнітних солей.

Розглянемо основні сфери застосування ефекту ЯМР у метрології.

6.2. Коротка історія використання ефекту ЯМР у метрології

Першим використанням ефекту ЯМР після його відкриття в 1946 р. стало вимірювання за його допомогою фізичної сталої – гіромагнітного відношення ядра водню – протона (γ_p). Перші дослідження γ_p були проведені Томасом (1950 р.), Дрісколом і Бендером (1958 р.) – всі NBC, США. Значний внесок у ці дослідження зробили також Вігуро (1962 р., NPL, Великобританія), Хара (1968 р., ETL, Японія), Кантуллер (1961 р., РТВ, Німеччина), Н.В. Студенцов з колегами (1961 р., ВНІМ, Росія), Г. К. Ягола, В. І. Зінгерман з колегами (1961 р., ХДНДІМ, Харків, Україна) [1,39]. Роботи з визначення гіромагнітного відношення протона несподівано дали побічний, але надзвичайно важливий результат, в одержанні якого також взяли участь учені ХДНДІМ [40]. Цей результат полягав у використанні ефекту ЯМР для уточнення розміру ампера, визначеного в SI за допомогою класичного методу ампер-вагів. Для розуміння цього результату розглянемо основні методи визначення гіромагнітного відношення протона за ефектом ЯМР.

Для визначення γ_p існує два типи експериментів: у слабкому і сильному магнітному полях. В одному з них значення B порівняне з геомагнітним слабким полем, в іншому – в тисячу разів перевищує його. В експерименті зі слабким полем ($B \sim 10^{-3}$ Тл) частота становить близько 50 кГц, а в експерименті з сильним полем ($B \sim 0,5$ Тл) вона дорівнює кілька мегагерц. Але основна різниця між цими експериментами полягає не у значенні магнітної індукції поля, а в підході до знаходження цього значення магнітної індукції.

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

$$\gamma_p = \frac{2\pi f_{\text{ямр}}}{B}. \quad (6.1)$$

При визначенні $\gamma_p(I_0)$ в слабкому магнітному полі I_0 джерелом магнітного поля є котушки (конттури) зі струмом без феромагнітних магнітопроводів. Магнітна індукція знаходиться розрахунковим шляхом за експериме-

нтальними вимірюваннями геометричних розмірів контурів і сили струму у провідниках контурів.

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

$$B = \frac{mg}{K_2 I}, \quad (6.2)$$

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

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

Особливістю методу сильного поля, порівняно з методом слабого поля, є те, що при знаходженні $\gamma_p(hi)$ сила струму I буде знаходитися у чисельнику виразу, а при знаходженні $\gamma_p(lo)$ – у знаменнику.

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

Безпосередня мета визначень гіромагнітного відношення протона полягає в такому:

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

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

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

У США у NBS (так у ті роки називався національний метрологічний інститут – NIST) протягом декількох років за допомогою установки зі слабким полем проводилися регулярні перевірки стабільності відтворення значення ампера. Результати спостережень довели, що значення ампера, отримане за допомогою еталонних елементів і резисторів, протягом майже п'яти років змінювалося не більше ніж на 10^{-4} % [40]. Це показувало, що одиницю сили струму дійсно можна було задовільно реалізувати через частоту прецесії протонів у магнітному полі, яке підтримувалось у соленоїді постійних розмірів. У роботі [39] було зазначено, що якщо поєднати обидва методи визначення γ_p , то відпадає необхідність у використанні ампер-ваг для реалізації ампера.

Дійсно, при експерименті у слабкому магнітному полі $I_1 = \frac{\omega_1}{\gamma_p} \cdot \frac{1}{K_1}$, у

сильному полі $I_2 = \frac{mg}{K_{2p}} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1}$, де ω_1, ω_2 – частота ЯМР у слабкому і сильному полях відповідно.

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

$$I = \sqrt{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \frac{F}{K_1 \cdot K_2}}. \quad (6.3)$$

Таким чином, сумісне використання двох установок, які реалізують вимірювання в слабкому і сильному полях, дозволяє визначити розмір ампера в системі SI. Явище ЯМР у цьому експерименті використовувалося тільки для компарування, а числове значення гіромагнітного відношення протона в розрахунку не фігурує. Детальний аналіз похибок, проведений при виконанні

цієї роботи, показав, що точність відтворення ампера цим методом вище, ніж традиційним на той час методом ампер-вагів. Це і дозволило внести відповідні уточнення в розмір ампера, про що вже йшлося вище.

Говорячи про значення ефекту ЯМР для метрології, підкреслимо, що найважливішою сферою його використання є відтворення розміру одиниці магнітної індукції магнітного поля постійного струму. Альтернативний метод – використання розрахункової струмової котушки – потребує прецизійних розрахунків коефіцієнта K_k , де необхідно враховувати не тільки геометричні розміри й форму котушки, але і її розташування відносно напрямків векторів магнітної індукції джерела магнітного поля, розподілення магнітного поля вздовж провідників зі струмом тощо. Такі розрахунки можливі лише для добре відомих форм. Але і в таких конструкціях гіромагнітне відношення протона і ефект ЯМР використовуються для узгодження розміру тесли в різних піддіапазонах.

Розглянемо використання методу ЯМР для відтворення одиниці магнітної індукції більш докладно.

6.3. ЯМР і еталони одиниці магнітної індукції

Безумовно найважливішим застосуванням ефекту ЯМР для метрології є відтворення на його основі абсолютного значення магнітної індукції і створення відповідних еталонів.

Спрощена структурна схема первинного еталона для середніх магнітних полів, створеного в ННЦ «Інститут метрології», наведена на рис.6.4. На відміну від схеми рис. 6.2 підкреслюється суттєвість наявності в еталоні систем стабілізації струму електромагніту і забезпечення однорідного стабільного магнітного поля в робочому зазорі магніту. Крім того, у складі еталона є системи стабілізації частоти ВЧ-генератора і керування роботою еталона й обробки результатів вимірювань. Для підвищення точності визначення частоти ЯМР використовується допоміжна амплітудна модуляція ВЧ-сигналу і синхронізація модульовальним НЧ-сигналом розгортки осцилографічного індикатора.

Основними складовими невиключеної систематичної похибки еталона є:

- вплив форми зразка і парамагнітних домішок у зразку;
- вплив деталей зонда на поле в ампулі;
- відхилення вимірюваної частоти від частоти ЯМР.

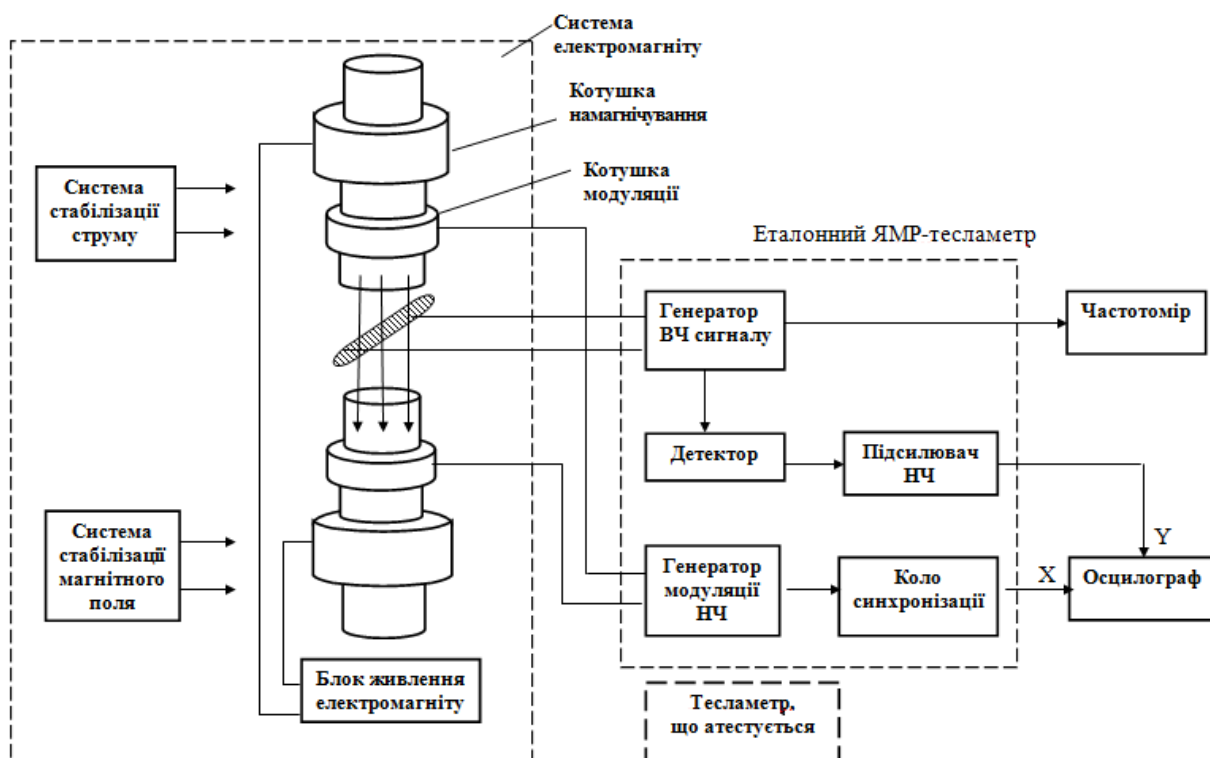


Рисунок 6.4 – Спрощена схема первинного еталона одиниці магнітної індукції

У СРСР були створені два первинних еталони на ефекті ЯМР: для області середніх магнітних полів (Україна) і сильних магнітних полів (Росія).

Перший з них має такі метрологічні характеристики [39]:

діапазон значень B	від 0,05 до 2 Тл;
СКВ (S_0)	$< 1 \cdot 10^{-6}$;
НСП (θ_0)	$< 3 \cdot 10^{-6}$;
нестабільність (ν)	$\sim 0,5 \cdot 10^{-6}$;
похибка передачі (S_{Σ})	$< 3 \cdot 10^{-6}$.

Передача розміру одиниці від первинного еталона робочим еталонам здійснюється шляхом розміщення датчиків ЯМР цих еталонів у спеціальні гнізда міжполюсних вставок еталона.

Еталон сильних магнітних полів (1–10 Тл) має деякі особливості. Для одержання однорідного і високостабільного магнітного поля у вимірювальному просторі, де розміщуються перетворювачі (датчики) робочих еталонів, застосована надпровідна котушка (міра) магнітної індукції з коригувальними обмотками.

Еталон може застосовуватися для атестації робочих еталонів, що працюють як у нормальних умовах, так і в умовах низьких температур (від 4,2 К), що

необхідно для розв'язання ряду науково-технічних завдань з технічного використання надпровідності. Зокрема, за його допомогою атестуються прецизійні надпровідні міри магнітної індукції.

До складу цього еталона входять еталонні тесламетри на ефекті ЯМР, перетворювачі і тесламетри Холла і згадані вище надпровідні міри.

Еталон має діапазон значень магнітної індукції 1–10 Тл, НСП $\theta_0 < 1 \cdot 10^{-5}$; СКВ $S_0 < 1 \cdot 10^{-6}$.

Передача розміру одиниці від державного еталона робочим еталонам здійснюється шляхом розміщення датчиків ЯМР цих еталонів у спеціальні гнізда міжполюсних вставок еталона.

Відзначимо, що деякі країни створили еталон одиниці магнітної індукції в діапазоні малих значень (менше $5 \cdot 10^{-2}$ Тл), у якому тесла відтворюється через основні одиниці SI – метр і ампер. У СРСР такий еталон був створений у 1981 р. [29]. Головним елементом еталона є еталонна котушка, через яку пропускається електричний струм (рис. 6.5).



Рисунок 6.5 – Блок еталонної струмової котушки

Магнітна індукція визначається відповідно до виразу

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

де K_B – стала струмової котушки за магнітною індукцією, яка розраховується за її геометричними розмірами (з численними поправками на неідеальність різних елементів); I – сила струму в обмотці; ΔB – невиключений залишок магнітного поля Землі.

Еталон являє собою унікальну конструкцію і містить у собі:

- згадану вище струмову еталонну котушку;
- міру постійного струму, що спирається на державні еталони постійної напруги й опору;
- систему автоматичної компенсації магнітного поля Землі і його варіацій;
- ряд додаткових пристроїв.

Еталон забезпечує відтворення одиниці магнітної індукції в діапазоні $5 \cdot 10^{-12}$ – $5 \cdot 10^{-2}$ Тл, а також ряд інших магнітних величин:

- одиницю постійного магнітного потоку – вебер;
- відношення магнітного потоку до магнітної індукції (Вб/Тл);
- одиницю магнітної індукції змінного поля;
- відношення магнітної індукції і магнітного потоку до сили струму (Тл/А; Вб/А).

Метрологічні характеристики еталона наведено в табл. 6.1. Розмір одиниці магнітної індукції, відтворений даним еталоном, погоджується з одиницями, відтвореними іншими еталонами, через *гіромагнітне відношення протона*.

Таблиця 6.1 – Метрологічні характеристики еталона

Вимірювана величина	Діапазон вимірювань	НСП	СКВ
Магнітна індукція, (на постійному струмі)	$1 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$ Тл	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-7}$
Відношення магнітної індукції до сили струму в інтервалі частот 0 – 10 кГц	$1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ Тл/А $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ Тл/А	$1,5 \cdot 10^{-6}$ $(1,5 - 3) \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-7}$ $9 \cdot 10^{-5}$
Магнітна індукція (частота 0 – 300 Гц)	$1 \cdot 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-5}$ Тл	$(1,5 - 3) \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Магнітний потік (на постійному струмі)	$1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ Вб	$1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-6}$
Відношення магнітного потоку до магнітної індукції (частота 10 кГц)	$1 \cdot 10^{-3}$ – 20 Вб/Тл	$1,5 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$ – $4 \cdot 10^{-5}$
Відношення магнітного потоку до сили струму (частота 0 і 20 – 30 Гц)	$1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ Вб/А	$1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-6}$

6.4. Використання ефекту ЯМР у магнітних вимірюваннях

6.4.1. Квантові магнітні перетворювачі

Важливе місце серед методів вимірювання магнітних величин займають квантові методи (або квантові перетворювачі), які у свою чергу поділяють на *ядерні, електронні і атомні* (рис. 6.6).

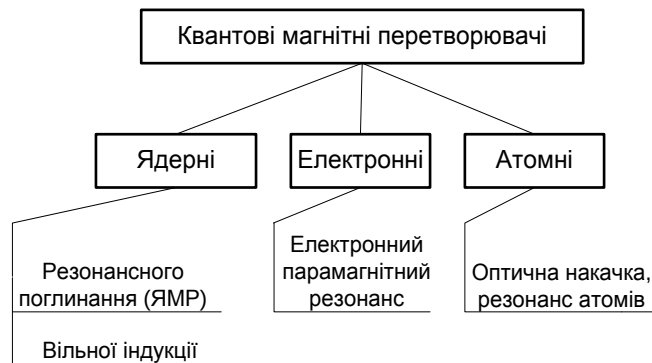


Рисунок 6.6 – Класифікація магнітних перетворювачів

Суттєвою особливістю *ядерних перетворювачів* є можливість їх використання для абсолютних вимірювань: вони не потребують градування або калібрування, не мають похибок, пов'язаних з умовами вимірювань (температурою, вологістю, тиском).

В ядерних перетворювачах використовують два методи: ядерного магнітного резонансу і «вільної ядерної індукції». Останній метод знайшов обмежене використання (для слабких магнітних полів, зокрема, Землі), має меншу точність і тут більш докладно не розглядатиметься.

Електронний перетворювач працює на основі електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) у речовинах, атоми яких мають неспарені електрони, завдяки чому електронна оболонка має дипольний магнітний момент. До них відносять елементи перехідної групи (вільні радикали), наприклад, розчин натрію в рідкому аміаці. Чутливість ЕПР-магнітометрів вище, ніж ЯМР, що дозволяє їх використовувати для малих B ($10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$ Тл), але похибка вимірювань значно вище, оскільки ширина сигналу ЕПР суттєво більше. Метод знайшов обмежене використання в наукових дослідженнях.

Атомні перетворювачі використовуються у слабких магнітних полях, для підсилення резонансного сигналу проводиться орієнтація магнітних моментів ядер за допомогою допоміжного постійного магнітного поля або оптичної накачки. В атомних перетворювачах використовується резонанс

атомів рубідію, цезію, гелію; застосовуються вони для вимірювання слабких магнітних полів (менше 10^{-4} Тл). Орієнтовні характеристики методів з різними перетворювачами наведені в табл. 6.2

Таблиця 6.2 – Характеристики магнітних перетворювачів

Метод	Діапазон вимірювань	Використання	Орієнтовна похибка
Ядерного магнітного резонансу	0,05 – 10 Тл	Прилади широкого використання	$10^{-5} - 10^{-4}$
Вільної ядерної індукції	до 10^{-4} Тл	Вимірювання слабких магнітних полів	$10^{-4} - 10^{-3}$
Електронного парамагнітного резонансу	до 10^{-3} Тл	Вимірювання слабких магнітних полів	10^{-3}
Резонансу атомів	до 10^{-4} Тл	Вимірювання слабких магнітних полів	10^{-3}

Найбільше використання знайшли *ЯМР-перетворювачі* завдяки широкому діапазону вимірювань (від 0,05 до 10 Тл) і високій точності.

6.4.2. Промисловий ЯМР-тесламетр

Ефект ЯМР знайшов застосування не тільки в засобах вимірювань наукового призначення, але і в *серійних промислових приладах*.

Наведемо приклад промислового приладу Ш1-9 для вимірювання індукції постійних магнітних полів магнітів, електромагнітів і соленоїдів.

Структурна схема приладу у принциповому плані близька до схеми ЯМР-тесламетра, що входить до рис. 6.3. Вона містить ВЧ-генератор з ЯМР-перетворювачем, який являє собою ампулу з робочою речовиною і намотаною на неї котушкою, що складає частину коливального контуру ВЧ-генератора.

ВЧ-генератор має вихідну частоту від 1 до 30 МГц (з переключенням піддіапазонів і плавним регулюванням). При збігу частоти прецесії ядер робочої речовини з частотою наведеного ВЧ-поля має місце ефект ЯМР, який супроводжується поглинанням електромагнітної енергії.

ВЧ-сигнал модулюється за амплітудою синусоїдальним сигналом з частотою 50 Гц, цим же сигналом здійснюється горизонтальна розгортка променя осцилографа.

ВЧ-сигнал з контура генератора подається на амплітудний детектор, де перетворюється в НЧ-сигнал – сигнал ЯМР. Цей сигнал підсилюється і подається на пластини вертикального відхилення осцилографічного індикатора. Умови ЯМР виконуються двічі за період модулюючої напруги. Оскільки

і горизонтальна розгортка променя, і амплітудна модуляція ВЧ сигналу відбувається від однієї напруги з частотою 50 Гц, на екрані осцилографічного індикатора спостерігається два стійких сигнали ЯМР, які можуть бути суміщені шляхом регулювання фази і виведені (тонким підстроюванням частоти) на центр екрана. Так забезпечується мінімальна похибка вимірювання частоти ЯМР.

При цьому $B = 2\pi/\gamma \cdot \mu \cdot f_{\text{ЯМР}}$, де $2\pi/\gamma \cdot \mu$ – стала ЯМР-перетворювача в мТл/МГц; γ – гіромагнітне відношення ядра робочої речовини; μ – магнітна проникність.

У ЯМР-перетворювачі використовують 3 види ядер: протони, літій і дейтерій залежно від рівня магнітної індукції (табл.6.3).

Таблиця 6.3 – Види ядер, що використовуються у ЯМР-перетворювачі

Рівні індукції B , мТл	Резонуючі ядра	Стала ЯМР-перетворювача, мТл/МГц
25–700	H^1 (протони)	23,4874
700–1020	Li^7 (літій)	60,435
1020–2500	D (дейтерій)	153,005

У приладі використовується також ряд додаткових пристроїв, які забезпечують автоматичну комутацію шкал частотоміра, проградуйованого у значеннях магнітної індукції, автоматичний і напівавтоматичний пошук сигналу ЯМР, а також підтримку умов ЯМР тощо.

Прилад забезпечує вимірювання магнітної індукції від $25 \cdot 10^{-3}$ Тл до 2,5 Тл у міжполюсних зазорах магніту з похибками близько 0,01 % (при неоднорідності магнітного поля $\delta = 0,02$ % на 1 см) і близько 0,1 % при $\delta = 0,05$ %. Вигляд ЯМР-сигналу наведено на рис. 6.7, а,б (а – у полі з неоднорідністю 0,02 % на 1 см, б – у полі з неоднорідністю 0,05 % на 1 см).

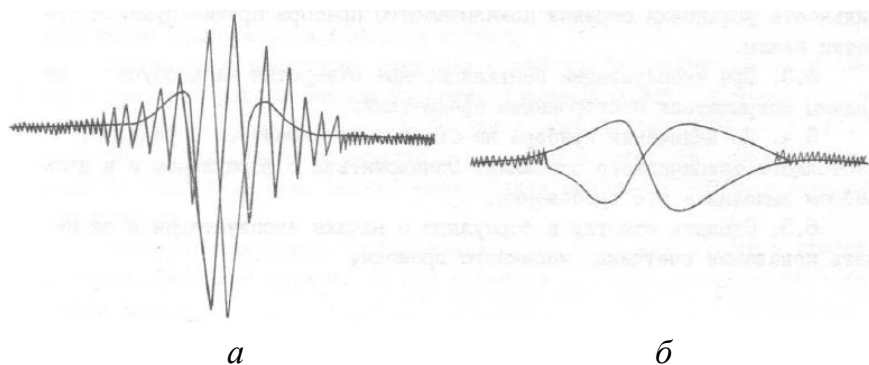


Рисунок 6.7 – ЯМР-сигнал

6.5. Інші використання ЯМР: наука, техніка, медицина

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

Ще однією сферою використання ефекту ЯМР є визначення з високою точністю відношення магнітних моментів речовин, які використовуються на практиці, зокрема дейтрона і протона, тритона і протона, ядра літія і протона тощо [40]. Ці дані важливі для досліджень у галузі молекулярної фізики і фізики рідини.

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

Дуже важливими сферами застосування ЯМР є також медицина (магнітно-резонансна томографія), фізика, біологія, контроль виготовлення бетону, якості шин, аналіз гірських порід, пошук нафти і природного газу.

Висновки

- Ефект ЯМР був першим з макроскопічних квантових ефектів, відкритих у XX столітті (1946 р.), які згодом знайшли широке розповсюдження в різних галузях науки і техніки. Використання цього ефекту в метрології, поряд з ефектами Джозефсона і Холла, привело до принципових змін у методології електричних і магнітних вимірювань.

- Першим використанням ефекту ЯМР після його відкриття в 1946 р. стало вимірювання за його допомогою фізичної сталої – гіромагнітного відношення ядра водню – протона.

- Важливим етапом застосування ефекту ЯМР у метрології у свій час стало вимірювання сили струму, зокрема, уточнення розміру ампера, відтвореного методом «струмових ваг».
- Найважливішою сферою використання ефекту ЯМР для метрології є відтворення розміру одиниці магнітної індукції магнітного поля постійного струму.
- Ефект ЯМР зберігає важливе значення для магнітних вимірювань, спектроскопії, медицини, фізики, біології, промисловості.

Контрольні питання

1. Що таке гіромагнітне відношення ядра?
2. Що таке ЯМР, у чому його суть?
3. Подайте схему реалізації ефекту ЯМР.
4. Які основні пристрої входять до складу еталона на ефекті ЯМР?
5. Яку одиницю відтворює цей еталон?
6. Які застосування ЯМР ви знаєте?
7. Поясніть основне рівняння ЯМР.
8. Які прилади на ефекті ЯМР ви знаєте?
9. Яку роль у дослідженні ефекту ЯМР відіграли дослідники українських вчених?
10. Яке застосування знайшов ЯМР у медицині?

Розділ 7

КВАНТОВІ ЕФЕКТИ І НОВА СИСТЕМА ЕЛЕКТРИЧНИХ ЕТАЛОНІВ

У розділах 4–6 було розглянуто нові методи відтворення абсолютних значень ряду електричних величин, а саме:

- напруги постійного і змінного струмів – на основі ефекту Джозефсона;
- активного опору, ємності і індуктивності – на основі квантового ефекту Холла;
- магнітної індукції і інших магнітних величин – на основі ефекту ЯМР.

У цьому розділі буде розглянуто методи відтворення основної величини від електрики – *сили струму і її одиниці – ампера*, а також величин, що характеризують інтенсивність електричних сигналів – *потужності і напруженості*.

Крім того, буде проаналізовано можливість створення принципово нової системи еталонів електричних величин, яка базується на ФФС і частоті.

7.1. Відтворення ампера на основі квантових ефектів

7.1.1. Опосередковане відтворення ампера

Існуюче на цей час у СІ визначення ампера (див. підрозд.1.6) – не більше як математична формула, яка не суперечить основним принципам побудови системи одиниць СІ, але не може бути основою реальної методики відтворення ампера, про що було сказано у підрозд.4.1. З прийняттям у 1988 р. МКМВ рекомендації про використання квантових ефектів Джозефсона і Холла для відтворення вольт і ома стало очевидно, що і шляхи відтворення абсолютного значення ампера слід шукати у квантових підходах.

Перший шлях «лежить» на поверхні: використання закону Ома для опосередкованого відтворення ампера на основі «квантового» вольт і «квантового» ома [29].

Розглянемо створену у різних країнах у такий спосіб апаратуру. В самому загальному вигляді вона містить міри постійної напруги і електричного опору, відкалібровані за квантовими ефектами Джозефсона і Холла відповідно, а також прецизійне (за стабільністю) джерело струму і струмовий ком-

паратор. За допомогою останнього розмір одиниці сили струму, «народжений» у колі 1, передається у коло 2 (рис.7.1).

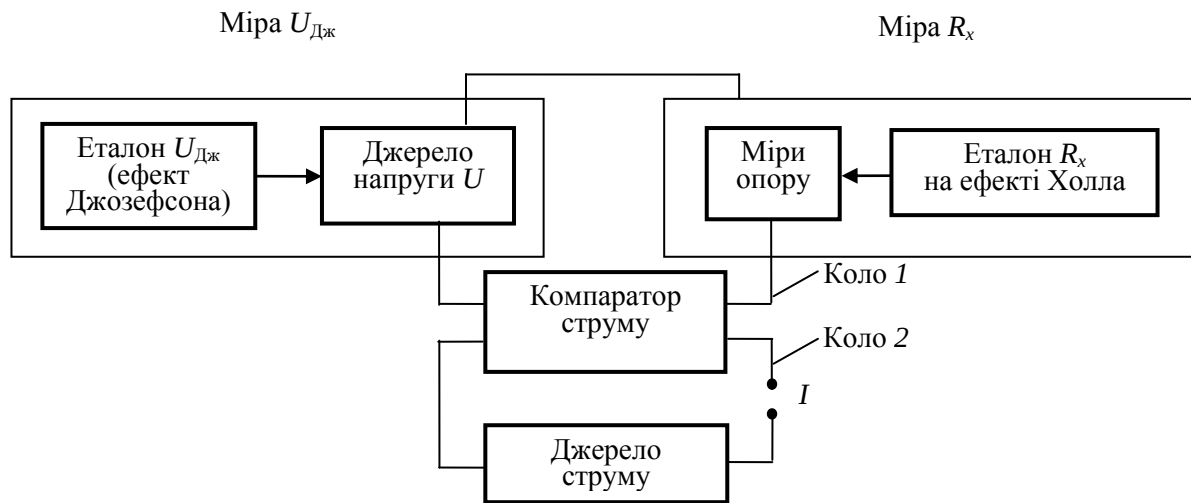


Рисунок 7.1 – Схема опосередкованого відтворення «квантового» ампера

Силу струму знаходять за виразом

$$I = \frac{U_{Дж}}{R_x},$$

де $U_{Дж}$, R_x – електричні напруга і опір, визначені шляхом порівняння з мірами на квантових ефектах Джозефсона і Холла:

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

$$R_x = \frac{h}{m e^2} = \frac{1}{m} R_K.$$

Тоді сила струму дорівнює:

$$I = n K_{Дж}^{-1} m R_K^{-1} f = \frac{1}{2} n m e f, \quad (1)$$

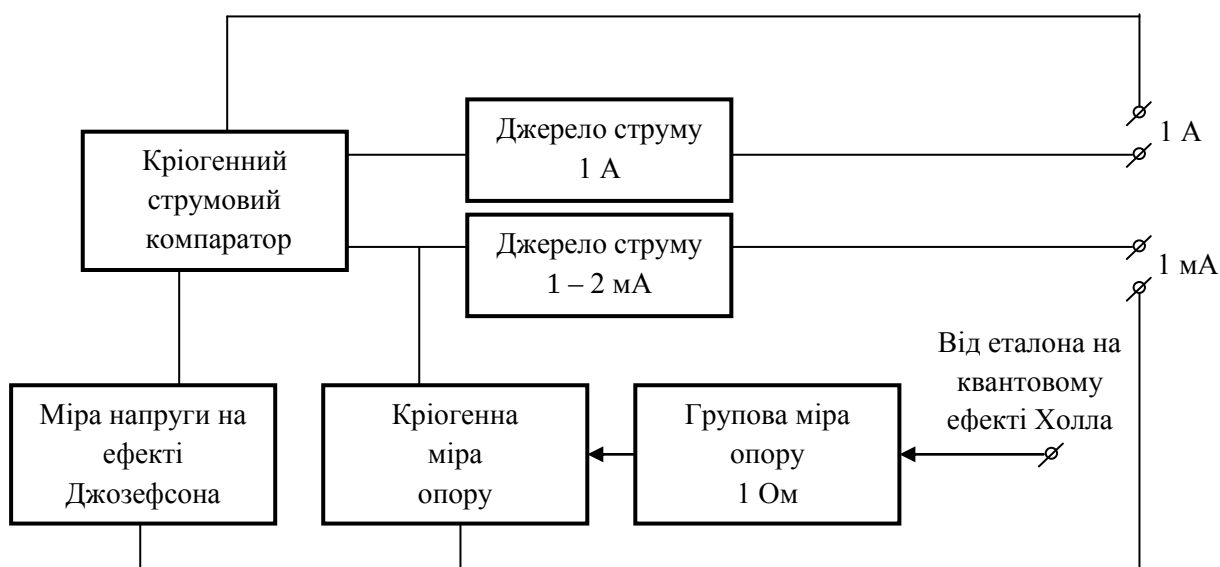
де n, m – цілі числа; f – частота опромінення; $K_{Дж}$ і R_K – сталі Джозефсона і Клітцинга відповідно. Таким чином, ампер відтворюється через частоту і сталі Джозефсона і Клітцинга (або через частоту і елементарний заряд).

Неважко бачити, що в такій реалізації ампер втрачає ознаки основної одиниці і стає похідною, простежується до елементарного заряду e (або сталі Джозефсона і Клітцинга).

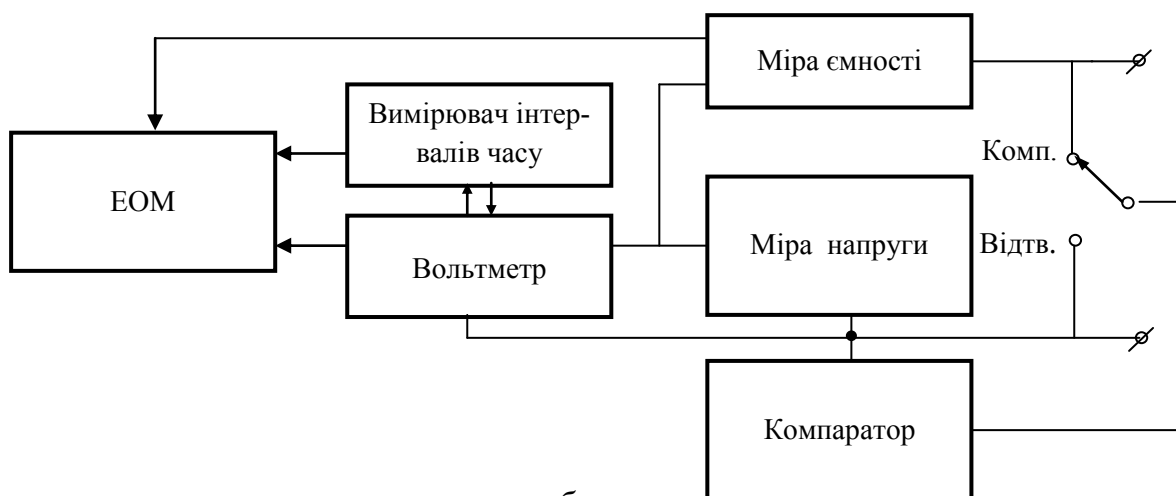
Розглянемо створений у такий спосіб еталон Росії. Еталон складається з двох комплексів засобів вимірювання, один з яких включає апаратуру для

відтворення одиниці сили струму на основі квантових ефектів, інший – апаратуру для одержання малих значень сили струму на основі методів електрометрії [41].

Комплекс для відтворення сили струму (рис. 7.2,*a*) складається з міри напруги на базі ефекту Джозефсона, набору кріогенних рівнономінальних резисторів, що комутуються надпровідним перемикачем, чотирьох еталонних мір електричного опору 1 Ом, атестованих за допомогою еталона на квантовому ефекті Холла, кріогенного струмового компаратора з нуль-індикатором на НКВІД (див. рис. 5.10). Комплекс являє собою багатозначну міру постійного струму з номінальними значеннями 1 мА і 1 А.



a



б

Рисунок 7.2 – Структурна схема еталона ампера з використанням квантових ефектів Джозефсона і Холла

Другий комплекс дозволяє встановлювати малі значення сили струму в діапазоні 10^{-16} – 10^{-9} А.

Основними елементами другого комплексу (рис. 7.2,б) є міра ємності C_0 , міра напруги, яка змінюється за лінійним законом, вимірювачі напруги U_d і часу T_d , компаратор. У режимі відтворення вихідний струм визначається за формулою

$$I_0 = U_d \frac{C_0}{T_d}.$$

У режимі компарування відбувається компенсація заряду, створюваного на одній з пластин конденсатора струмом I_x , зарядом, створюваним на іншій пластині конденсатора відомим струмом I_0 , тобто здійснюється зустрічне включення багатозначної міри струму I_0 й джерела I_x , що калібрується. При повній компенсації $I_x = I_0$.

Невизначеність відтворення сили струму в діапазоні від $1 \cdot 10^{-3}$ до 1 А становить $(1-2) \cdot 10^{-7}$.

7.1.2. Перспектива прямого відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання

Ефект одноелектронного тунелювання, або «ефект Ліхарева» було теоретично передбачено і експериментально перевірено ще у 80-ті роки минулого століття [42].

Даний ефект виявляється у виникненні сходинок на осі струму вольт-амперних характеристик надпровідних джозефсонівських переходів малої ємності при їх опроміненні НВЧ-полем (на відміну від класичного джозефсонівського ефекту, де ці сходинокки мають місце на осі напруги). При цьому відстань між сходинками (тобто значення сили струму I) залежить лише від частоти проходження електронів f і сталої – заряду електрона e : $I = ef$. Це відкриває шлях до побудови квантового еталона ампера на основі цього ефекту. Оскільки квантові еталони вольта й ома вже існують, створення квантового еталона ампера дозволить замкнути так званий «трикутник квантових еталонів» (рис. 7.3), тобто забезпечити незалежне відтворення трьох базових електричних одиниць на основі квантових ефектів. Це може стати серйозним імпульсом до подальшого розвитку метрології в електриці.

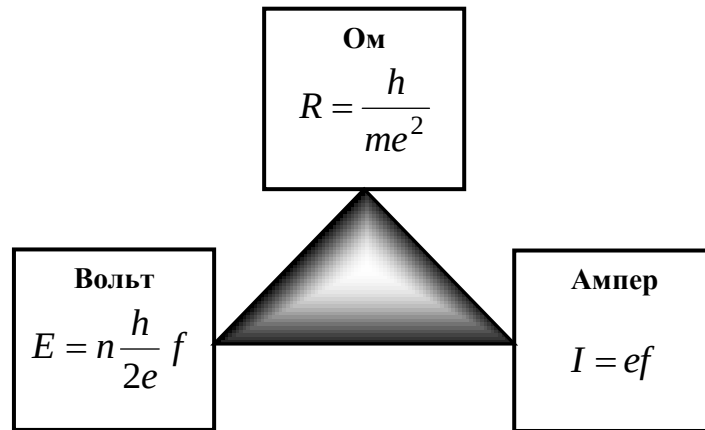


Рисунок 7.3 – «Трикутник» квантових еталонів

Роботи зі створення джерела струму на ефекті одноелектронного тунелювання, необхідного для замикання квантового трикутника, ведуться вже близько двадцяти років у багатьох країнах, і в цьому напрямку досягнуті певні успіхи.

Сьогодні відомі кілька варіантів приладів на ефекті одноелектронного тунелювання (SET-Single Electron Tunneling): так званий одноелектронний транзистор (SET-транзистор), виготовлений з використанням нанотехнологій [20] у NIST (США) сумісно з МДУ (Росія) і РТВ (Німеччина), а також більш складний пристрій, названий одноелектронним насосом (SET-pump) [20].

У США був створений електронний насос з сімома тунельними переходами і шістьма затворами. У результаті, за оцінками авторів, похибка рахування окремих електронів знизилася до $1,5 \cdot 10^{-8}$. Проте максимально досягнуте значення струму на плато $6 \cdot 10^{-12}$ А при частоті маніпулювання електронами значення $f = 20$ МГц є все ще малим для прецизійних вимірювань.

У рамках проекту Євросоюзу в РТВ (Німеччина) був створений електронний насос з трьома тунельними переходами, в якому придушення ефектів паразитного додаткового тунелювання досягається напленням додаткових високоомних (50 кОм) резисторів, послідовно підключених до виводів пристрою (R-pump).

Вагомі оригінальні роботи в цьому напрямку були також проведені в метрологічному центрі Франції BNM-LNE.

У зв'язку з труднощами реалізації джерела струму, що базується на

SET-пристроях, NIST (США) був запропонований інший шлях проведення експериментів щодо встановлення зв'язку квантових еталонів вольт, ома і ампера [20], який показано на рис.7.4. У NIST, а пізніше і в РТВ, були розгорнуті роботи зі створення еталона одиниці ємності – фаради, що базується на виготовленні кріогенного конденсатора ємністю 1–10 пФ з надмалим рівнем витoku і малою залежністю ємності від частоти і напруги. Цей конденсатор спочатку заряджають за допомогою джерела одиночних електронів – електронного насоса, а електрони перераховуються електрометром на основі SET-транзистора.

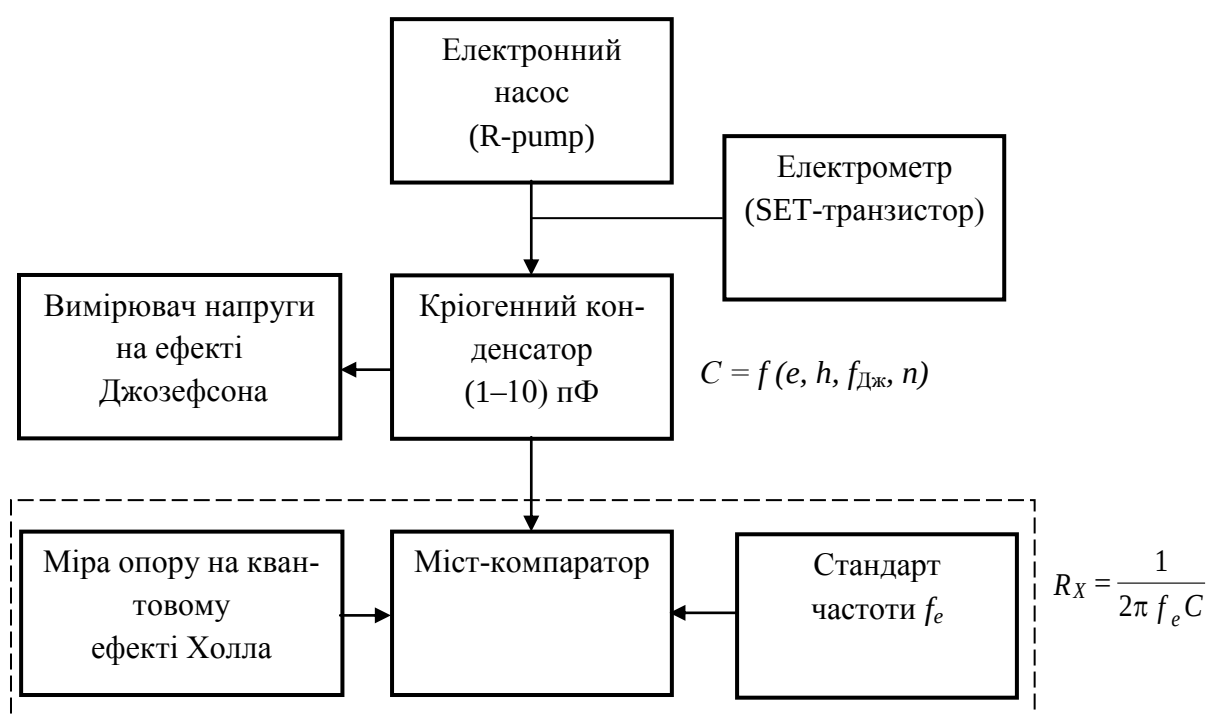


Рисунок 7.4 – Варіант реалізації трикутника квантової метрології

Напругу на конденсаторі передбачається вимірювати за допомогою еталона, що використовує ефект Джозефсона. У результаті ємність кріогенного конденсатора буде виражена через фундаментальні константи e , h , НВЧ-частоту і цілі числа – номер сходинки на ВАХ джозефсонівської мікросхеми і число електронів, розміщених на конденсаторі.

У наступному експерименті імпеданс конденсатора порівнюється з опором, відтвореним за допомогою холлівської структури (див. рис. 7.4), на змінному струмі, з використанням моста-компаратора і еталонної частоти f_e .

Згідно з описаними вище оцінками є надія реалізувати вимірювання з невизначеністю 10^{-8} , однак досягти такого результату буде дуже важко.

Як видно з наведеного стислого огляду, до теперішнього часу на основі ефекту одноелектронного тунелювання вже створено ціле покоління принципово нових пристроїв. Однак завдання замикавання трикутника квантової метрології ще далеке від розв'язання.

Коли підручник вже був підготовлений до видання, з'явилась публікація в РТВ-NEWS (2016, №1) про нові результати, отримані у РТВ зі створення еталона струму на основі методів одноелектронного тунелювання. В ній сказано, що у розробленому в РТВ насосі на частоті 545 МГц досягнуто струм 100 пА і невизначеність його відтворення $2 \cdot 10^{-7}$, що на сьогодні є кращим результатом у світі.

7.2. Квантові ефекти і вимірювання параметрів інтенсивності

Найбільше поширення для точних вимірювань параметрів інтенсивності випромінювання на будь-якій частоті одержав метод теплового компарування, який полягає в порівнянні теплових енергій (потужностей) постійного і змінного струмів за допомогою термоперетворювача (ТП) [29].

Метод ґрунтується на законі збереження енергії, за яким при повному поглинанні однаковим кількостям енергії відповідають однакові кількості тепла незалежно від виду чи частоти випромінювання.

Метод забезпечує передачу одиниць напруги, сили струму, потужності постійного струму до тих же одиниць змінного струму на різних частотах (у західній термінології – AC-DC transfer). Параметри постійного струму визначають з необхідною точністю на базі квантових ефектів, розглянутих вище.

7.2.1. Еталони змінної напруги і змінного струму

Діапазон частот, у якому створюють еталони одиниць змінної напруги, становить від одиниць герц до 2 – 3 ГГц (вище цих частот вимірюють потужність). В усьому діапазоні цих частот використовується метод теплового компарування, але його апаратурна реалізація в різних частотних піддіапазонах суттєво відрізняється. Так, у діапазоні до ~ 100 кГц як ТП використовуються багатоелементні термопари, на вищих частотах (приблизно до 30 МГц) найкращі результати одержано з використанням одноелементних

вакуумних безконтактних термоперетворювачів (ТВБ). Вище 30 МГц застосовуються, як правило, терморезистори – болометри, термістори, які змінюють свій електричний опір при нагріванні. Одним з варіантів реалізації методу теплового компарування у ВЧ-діапазоні є використання навантаження ТП безреактивного резистора (рис. 7.5). Існує також варіант методу теплового компарування, який полягає у вимірюванні ВЧ-потужності на відомому імпедансі і обчисленні ВЧ-напруги.

Суттєво відрізняються також і рівні відтворюваних напруг у різних частотних піддіапазонах – від 1000 В на НЧ до 1 В на частотах 1 ГГц і вище.

Різні вимоги до динамічних діапазонів відтворення напруги і різні варіанти рішень методу теплового компарування призводять до необхідності створення кількох еталонів напруги змінного струму. Світова практика свідчить, що необхідний діапазон частот напруги змінного струму перекривається, як правило, двома – трьома еталонами, які працюють у піддіапазонах: 10 Гц – 1 МГц; 1 МГц – 30 МГц; 30 МГц – 1(3) ГГц. Саме в цих піддіапазонах створені первинні еталони України [29].

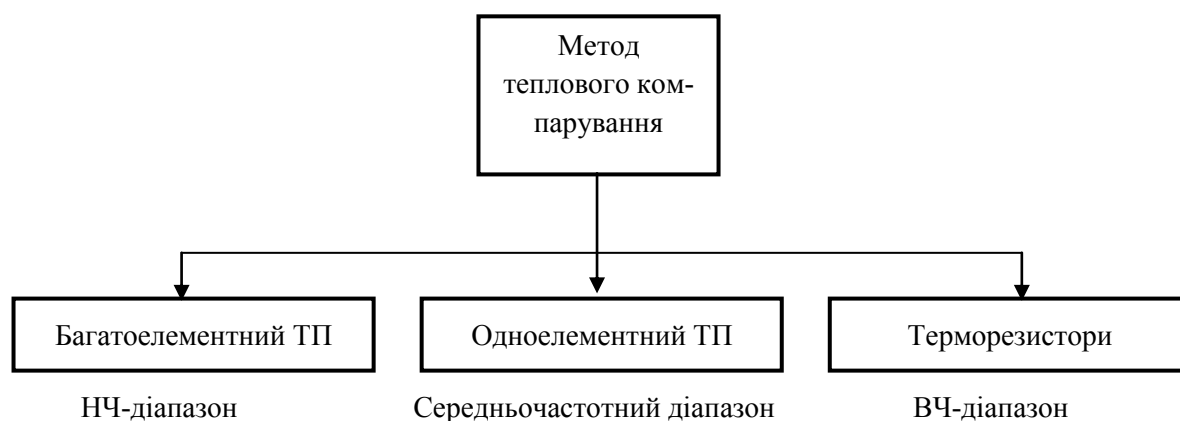


Рисунок 7.5 – Варіанти реалізації методу теплового компарування

Орієнтовні значення відносної розширеної невизначеності відтворення напруги еталонів передових країн складають:

$10^{-6} - 10^{-4}$ – в діапазоні частот 10 Гц – 1 МГц

$(1-3) \cdot 10^{-4}$ 1 – 30 МГц

$(3-20) \cdot 10^{-4}$ 30 – 1000 МГц.

У різноманітних галузях науки і техніки, перш за все, в енергетиці, системах транспортування електрики, для обліку електроенергії існує необхідність точного вимірювання *високих напруг* (сотні кіловольт) як на постійному

струмі, так і на змінному струмі промислової частоти (50, 60 Гц). Зважаючи на особливості високовольтної техніки виникла необхідність у створенні в цьому діапазоні напруг окремих первинних еталонів. Такі еталони створено у США, Німеччині, інших країнах, у тому числі і в Україні. Розширена невизначеність відтворення високих напруг становить орієнтовно $(1 - 5) \cdot 10^{-4}$.

В еталонах одиниці *сили змінного струму* застосовується та ж методологія, що і в еталонах змінної напруги НЧ-діапазону, а для вимірювань використовується описаний вище метод теплового компарування з різночасовим порівнянням теплової дії змінного і постійного струмів [36, 37].

Первинні еталони такого виду забезпечують відтворення розміру ампера в діапазоні струмів від 10^{-3} до 20 А і діапазоні частот від 20 до 10^6 Гц з розширеною невизначеністю від $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-4}$.

7.2.2. Еталони одиниці електричної потужності на промисловій і низьких частотах

Метрологічні роботи, пов'язані з відтворенням одиниць потужності й енергії великих рівнів на промисловій частоті 50 Гц, повіркою і калібруванням ЗВ потужності не можуть бути проведені ні при реальній, ні при прохідній потужності, оскільки це пов'язано зі створенням прецизійних генераторів великої потужності і ряду високостабільних комплексних навантажень, здатних цю потужність розсіяти. Тому ці роботи виконуються при *фіктивній* потужності, коли напруга і струм подаються у вхідні ланцюги ЗВП від окремих малопотужних джерел. Цей шлях виявився найбільш раціональним для розв'язання метрологічних завдань, зокрема, для створення еталона одиниці електричної потужності на промисловій частоті.

Еталон, як правило, будується таким чином. Відтворюється мале значення активної потужності (потужності поглинання), яке вимірюється методом теплового компарування за допомогою еталонів постійної напруги і електричного опору. Далі за допомогою прецизійного дільника відбувається передача розміру одиниці від потужності поглинання до фіктивної потужності [29].

Цей метод знайшов застосування в еталонах багатьох країн.

Еталони, побудовані на основі цього методу, мають такі характеристики:

діапазон вимірювань, Вт	$0,01 - 6 \cdot 10^3$;
НСП (θ_0)	$(2 - 5) \cdot 10^{-5}$;
СКВ (S_0)	$(5 - 10) \cdot 10^{-6}$;
розширена невизначеність	$(2 - 5) \cdot 10^{-5}$.

В Україні створено державний еталон потужності, що працює в діапазоні частот від 40 Гц до 1 кГц і має відповідні метрологічні характеристики.

В Німеччині і США створено еталони, в яких використовується відтворення змінної НЧ-напруги методом Джозефсона.

7.2.3. Еталони одиниці потужності ВЧ і НВЧ-діапазонів

Еталони ВЧ і НВЧ-діапазонів будуються за єдиною методологією. Кожен еталон включає джерело випромінювання (генератор), еталонний вимірювач потужності на основі методу теплового компарування, засоби атестації.

Основні метрологічні характеристики первинних еталонів потужності ВЧ- і НВЧ-діапазонів наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Характеристики первинних еталонів потужності

Діапазон частот, ГГц	Межі відтворюваної потужності, мВт	Відносна розширена невизначеність
0,03–37,5	до 100	$(1-3) \cdot 10^{-3}$
37,5–78,3	до 10	$5 \cdot 10^{-3}$
78,3–178,6	до 10	$1 \cdot 10^{-2}$

7.2.4. Еталони одиниць напруженості електромагнітного поля

На сьогодні найбільш поширеними є еталон *напруженості електричного поля* і еталон *напруженості магнітного поля* – на частотах до 30 МГц, а також еталон *напруженості електричного поля* в діапазоні 30–1000 МГц. У всіх еталонах для зв'язку з параметрами постійного струму використовується метод теплового компарування, а далі вони простежуються до ФФК і квантових еталонів (рис. 7.6).

7.3. Нова система еталонів у галузі електрорадіовимірювань

Відкриття квантових ефектів, розробка на їх основі *референтних методів* вимірювання ряду електричних величин, а також офіційне визнання цих методів МКМВ (1988 р.) створили передумови для переходу до принципово нової системи еталонів у галузі електрорадіовимірювань. Цей процес почався з 1990 р і продовжується по цей час.

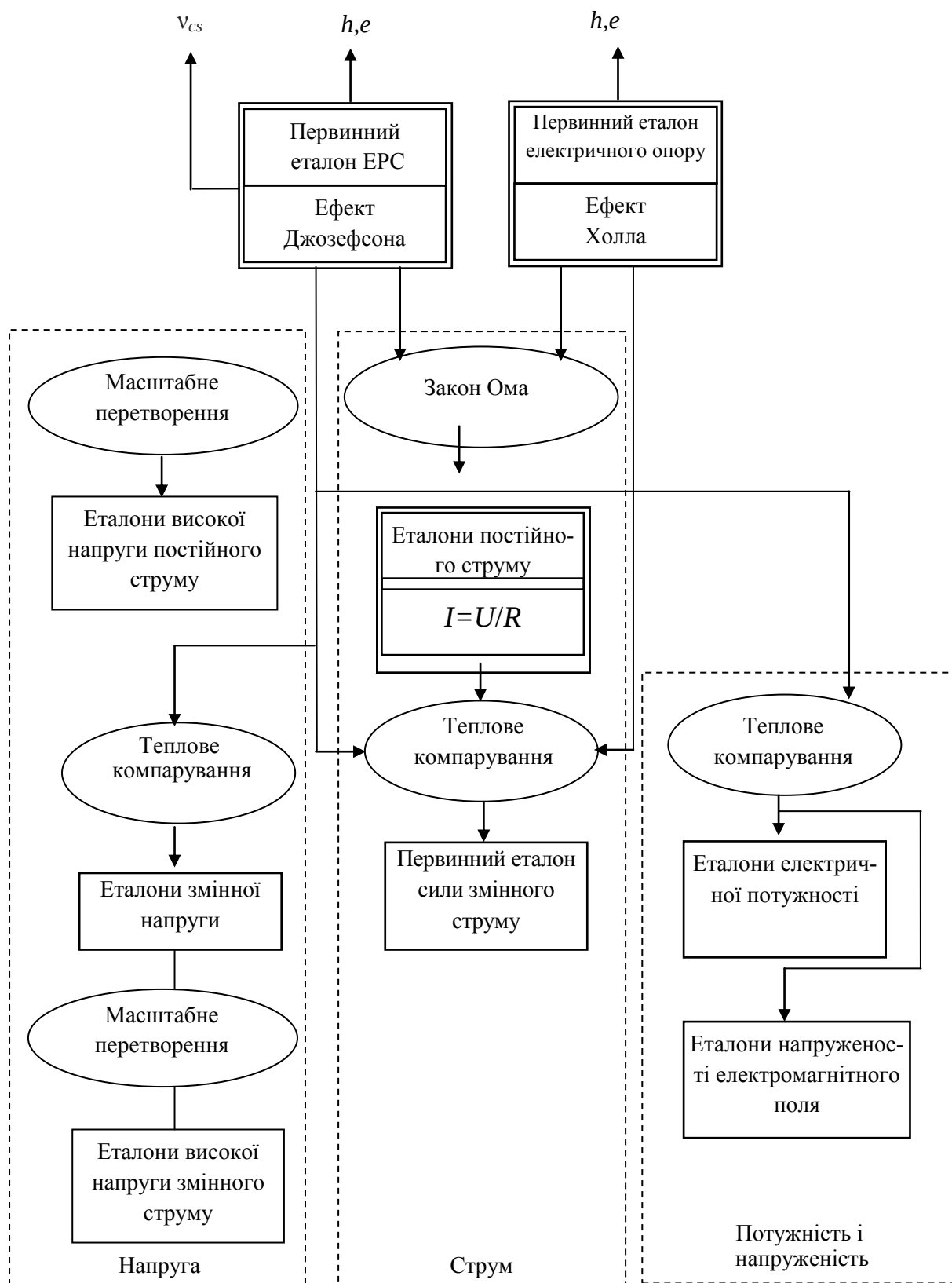


Рисунок 7.6 – Система еталонів параметрів інтенсивності і їх простежуваність до ФФС

Будемо називати еталони, побудовані на основі діючого в SI визначення ампера і сталих μ_0 і ϵ_0 , *еталонами SI*, а еталони, створені на основі квантових ефектів, *еталонами практичної SI*.

Систему еталонів практичної SI у галузі електричних вимірювань, яка ґрунтується на простежуваності до ФФС, подано на рис. 7.6. Наведемо деякі пояснення.

Розглянуті вище *квантові еталони вольт, ома, тесла* разом з еталоном секунди на квантовому ефекті надтонкого переходу в Cs^{133} , завдяки високій точності, надійності та доступності, стали *базовими еталонами* цієї системи. На основі «квантового» вольт і «квантового» ома відтворюється «квантовий» ампер (підрозд. 7.1).

Передача розмірів одиниць сили струму та напруги з постійного на змінний струм (AC–DC transfer) відбувається за допомогою методу *теплого компарування*, визнаного найбільш точним (не враховуючи розглянутий нижче метод Джозефсона). При цьому зберігається простежуваність одиниць сили змінного струму і змінної напруги до ФФС (рис.7.6).

Аналогічно, на основі методу *теплого компарування* відтворюються одиниці інших параметрів інтенсивності: потужності і напруженості електромагнітного поля – у широкому діапазоні частот.

В основі відтворення параметрів електричних кіл (опору, індуктивності, ємності) лежить *KEX і мостовий метод*.

За допомогою квантового еталона одиниці магнітної індукції і відомих співвідношень відтворюються інші магнітні одиниці на постійному і змінному струмі.

Створення практичної системи еталонів (рис. 7.7), яка базується на квантових ефектах, дозволило суттєво (на 2–3 порядки) підвищити точність електричних вимірювань, підняти взаємоузгодженість електричних одиниць, а також зробити більш доступною найвищу точність для практичної метрології.

Додамо, що на цей час (2017 р.), поки офіційно діє визначення ампера через механічні величини і μ_0 , залишається *дуалізм*. З перевизначенням ампера через елементарний заряд e , яке готується, дуалізм буде усунено, а практична *SI* стане *Новою SI (New SI)*.

Порівняльні характеристики еталонів системи SI і практичної SI наведені в табл. 7.2, а зв'язок базових електричних одиниць з ФФС можна відобразити у вигляді, наведеному на рис. 7.8 [43].

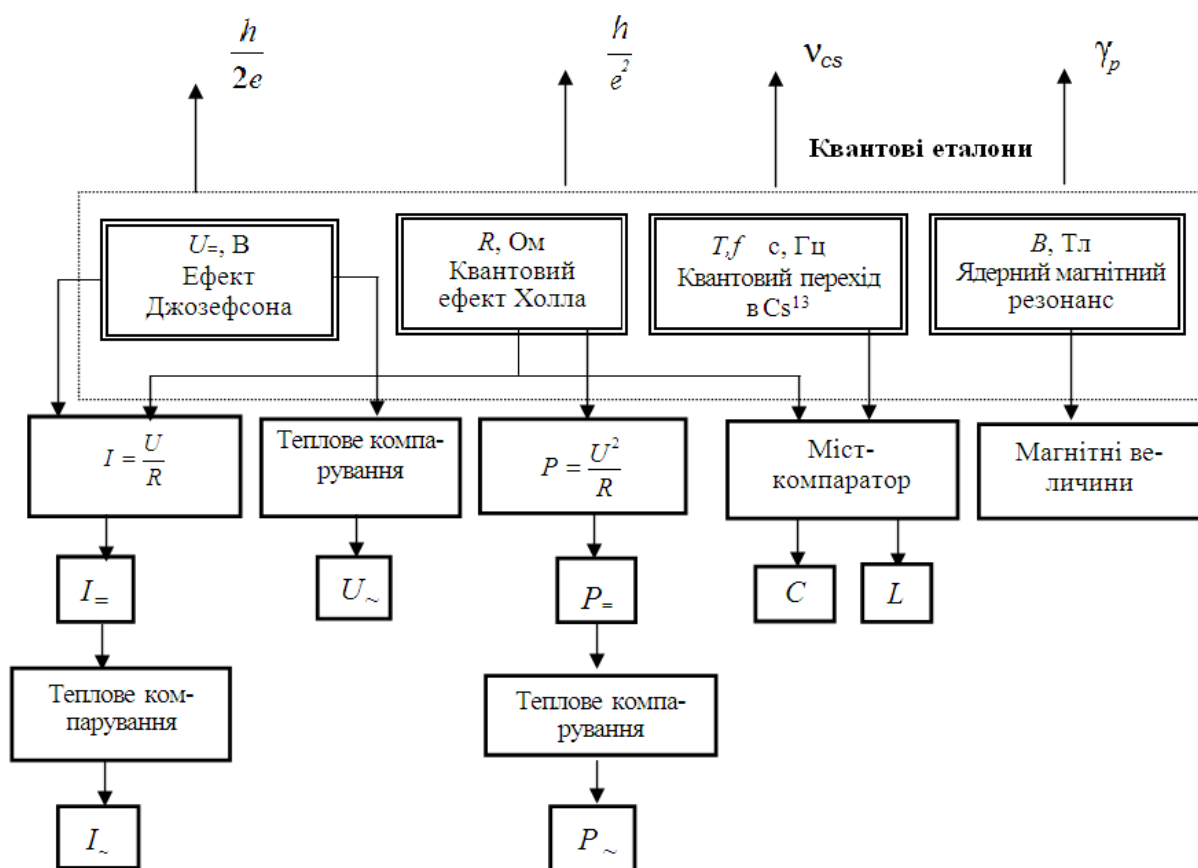


Рисунок 7.7 – Система еталонів практичної SI в галузі електричних вимірювань

Таблиця 7.2 – Порівняльна характеристика еталонів системи SI і практичної SI

Показники	Еталони системи SI	Еталони практичної SI
Методологія побудови еталонів	Механічні вимірювання	Квантові ефекти
Технічні засоби первинних еталонів	Струмові ваги Міри ЕРС (нормальні елементи, твердотільні міри) Розрахунковий конденсатор Розрахункова магнітна котушка	Високотехнологічні квантові мікроструктури Надпровідникова техніка Кріогенна техніка
Розширена невизначеність вимірювання	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-9}$
Загальні експлуатаційні показники	Висока трудомісткість Обмежена стабільність Залежність від впливаючих факторів	Висока стабільність та доступність Незначна залежність від впливаючих факторів
Система забезпечення єдності	Централізована (простежуваність до системи SI)	Можлива децентралізація (простежуваність до ФФС)

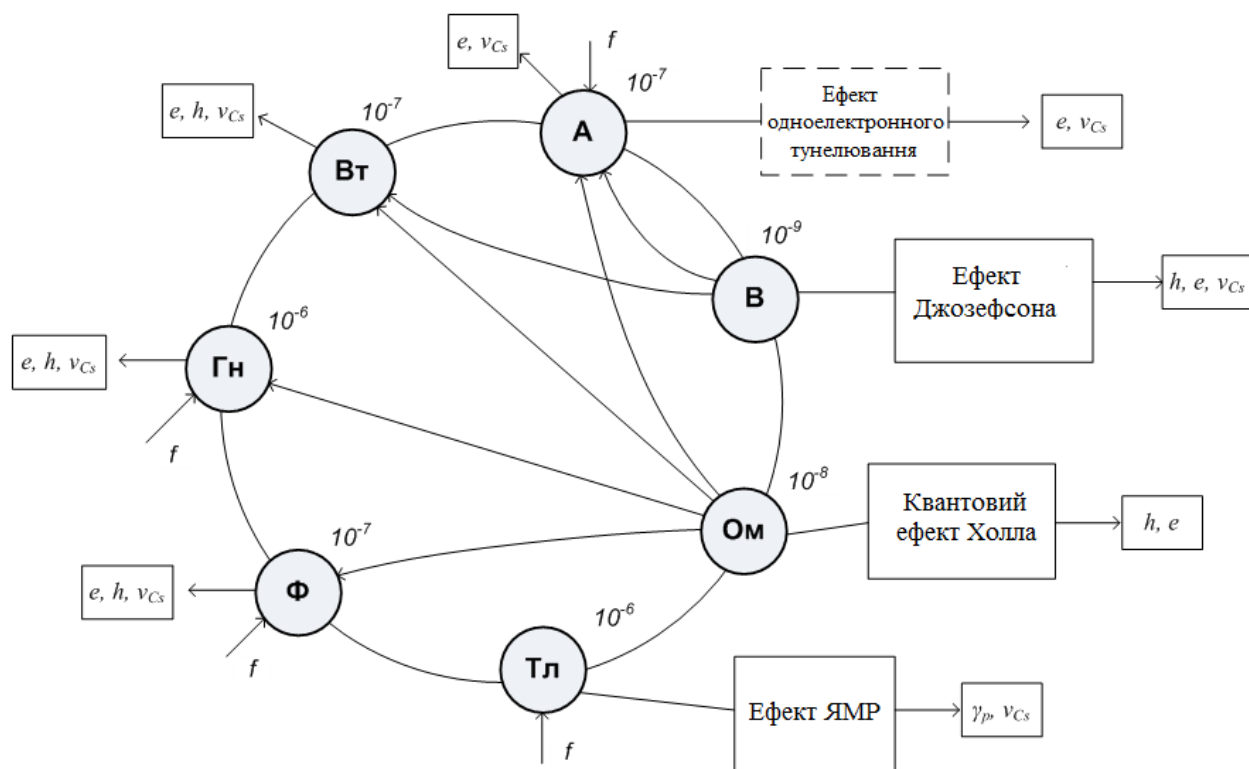


Рисунок 7.8 – Зв’язок електричних одиниць з ФФС у практичній SI

Узгодження електричних одиниць у New SI забезпечується тим, що всі вони простежуються до ФФС. У табл. 7.3 наведені вирази найбільш поширених одиниць через ФФС і досягнута на сьогодні невизначеність їх відтворення.

Таблиця 7.3 – Вирази електричних одиниць через ФФС

Одиниця	Формула	Стандартна невизначеність
Вольт	$U_j = n \frac{h}{2e} f_j$	$u_{\text{ст}} \sim 10^{-9}$
Ом	$R_X = \frac{h}{me^2}$	$u_{\text{ст}} \sim (3-5)^{-8}$
Ампер	$I = \frac{1}{2} n m e f_j$	$u_{\text{ст}} \sim 10^{-7}$
Тесла	$B_{\text{ямр}} = \frac{2\pi f_{\text{ямр}}}{\gamma_p}$	$u_{\text{ст}} \sim 10^{-6}$
Ват	$P = \frac{U^2}{R} = \frac{1}{4} n^2 m h f_j^2$	$u_{\text{ст}} \sim 10^{-6}$
Емність (фарада)	$C_X = \frac{me^2}{h2\pi f_{\text{Cs}}}$	$u_{\text{ст}} \sim 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-7}$

Як видно з поданої таблиці, відтворення електричних одиниць у межах класичної SI проводились через механічні величини і розрахункові методи, в той час як практична система і New SI відкривають шлях квантовим методам і простежуваності до ФФС, що забезпечує більш високі метрологічні і експлуатаційні характеристики [43].

Висновки

- На базі «квантових вольтів і омів» може бути відтворений «квантовий ампер» (з використанням закону Ома) з невизначеністю близько $(1-2) \cdot 10^{-7}$. У перспективі можливе також пряме відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання.
- Одним з актуальних завдань у метрології є «замикання» квантового трикутника, що забезпечить незалежне відтворення за допомогою квантових методів базових електричних одиниць і обіцяє нові метрологічні можливості.
- На базі квантових ефектів створено практичну систему еталонів електричних одиниць, яка забезпечує високу точність, стабільність і взаємозгодженість одиниць, але не відповідає діючим сьогодні визначенням цих одиниць у SI. Таким чином, в електричних вимірюваннях виник дуалізм, тобто паралельне існування двох систем одиниць: SI і практичної.
- Визначення ампера через елементарний заряд і введення New SI ліквідує дуалізм, що дуже важливо для метрології і науки в цілому.
- Апаратура, що ґрунтується на квантових ефектах, не потребує постійного підстроювання, частішої атестації тощо для реалізації найвищої точності, що необхідно для еталонів системи SI. Така апаратура менш чутлива до умов реалізації, має більш високі експлуатаційні характеристики.
- Квантові ефекти і еталони використовують високотехнологічні процеси і структури (надпровідність, кріогенну техніку, квантові мікроструктури). І хоча вони більш складні у виготовленні, але забезпечують більш високу точність, стабільність, відтворюваність і надійність, що піднімає систему забезпечення єдності вимірювань на якісно новий рівень.
- Названі вище властивості нової системи свідчать про її безумовну перевагу над системою, яка ґрунтується на механічних вимірюваннях, що вже призвело до її практичного застосування. Подальшими кроками мають стати офіційне введення в дію нових визначень і New SI.

Контрольні питання

1. Що таке «ефект одноелектронного тунелювання»?
2. Чи можна відтворити ампер на основі квантових ефектів?
3. Що таке «трикутник квантової метрології»?
4. «Практична» система електричних еталонів: у чому її суть і відмінність від еталонів SI?
5. Що означає дуалізм в електричній метрології? Який шлях його подолання?
6. Назвіть особливості і позитивні риси квантових еталонів в електричних вимірюваннях.
7. Які ви бачите перспективи подальшого розвитку квантової метрології в електриці?
8. Який основний метод використовується для передачі розмірів одиниць з постійного струму до змінного?

Розділ 8

КВАНТОВА МЕТРОЛОГІЯ І ПРИРОДНИЙ ЕТАЛОН МАСИ

8.1. Історія еталона маси

При введенні метричної системи було сформульовано вимогу до неї щодо опори на «прототипи, взяті з природи». Але на практиці реалізувати цю вимогу виявилось нелегко [44].

Щодо кілограма, то він був визначений як маса 1 дм³ води за температури її максимальної густини (+4 °C). У XIX сторіччі були проведені численні експерименти з реалізації цього визначення, але кожне нове вимірювання давало інший результат. Посилення контролю за умовами вимірювань, урахування все нових і нових джерел похибок заводили у глухий кут, тому що кожного разу вимірювання давало інший результат. 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, яке збереглось і дотепер, полягає в тому, що маса артефакту через його походження не може бути абсолютно стабільною, і його властивості з часом тією чи іншою мірою змінюються. 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 становлять 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 існуючого визначення кілограма полягає також у тому, що невідома величина дрейфу ІРК також впливає на інші одиниці, тому що за діючими на сьогодні визначеннями ампер, моль і кандела залежать

від кілограма. Тому вже багато років провідними НМІ ведуться роботи з пошуку шляхів побудови природного еталона кілограма [44].

На 21-й CGPM (1999 р.) було рекомендовано (Резолюція 7), 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 сьогодинішнім визначенням»*.

Коли визначення кілограма буде ґрунтуватися на «інваріантах природи» замість матеріального артефакту, стане можливою практична реалізація одиниці маси SI у будь-якому місці і у будь-який час.

8.2. Типова структура еталона кілограма і еталон України

Але сьогодні в SI діє визначення кілограма через масу ІРК, тому розглянемо типову структурну схему еталона кілограма, що ґрунтується на існуючому визначенні. Схема містить у собі:

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

У набір еталонних гир міжнародного еталона ВІРМ входить ІРК і кілька його офіційних копій. Еталонні гирі країн-підписантів Метричної конвенції також виготовлені з платино-іридієвого сплаву.

Наразі ІРК зберігається в повітрі під трьома скляними ковпаками у ВІРМ і являє собою циліндр діаметром і висотою 39 мм, виконаний із сплаву платини та іридію, масова частка яких становить 90 та 10 % відповідно. Внаслідок неминучого накопичення забруднюючих частинок на поверхні (приблизно 1 мкг на рік) ІРК – це об'єкт, поверхню якого необхідно очищати від забруднення. З цією метою СІРМ ухвалив, що еталонна маса ІРК – це маса прототипу після очищення і миття спеціальними методами.

У первинному еталоні України до складу *системи відтворення* входять (рис. 8.1):

- національний прототип одиниці маси 1 кг і 2 еталони-копії, виготовлені з аустенітної нержавіючої сталі спеціального складу;

- набір еталонних гир масою від 1 мг до 5 кг.

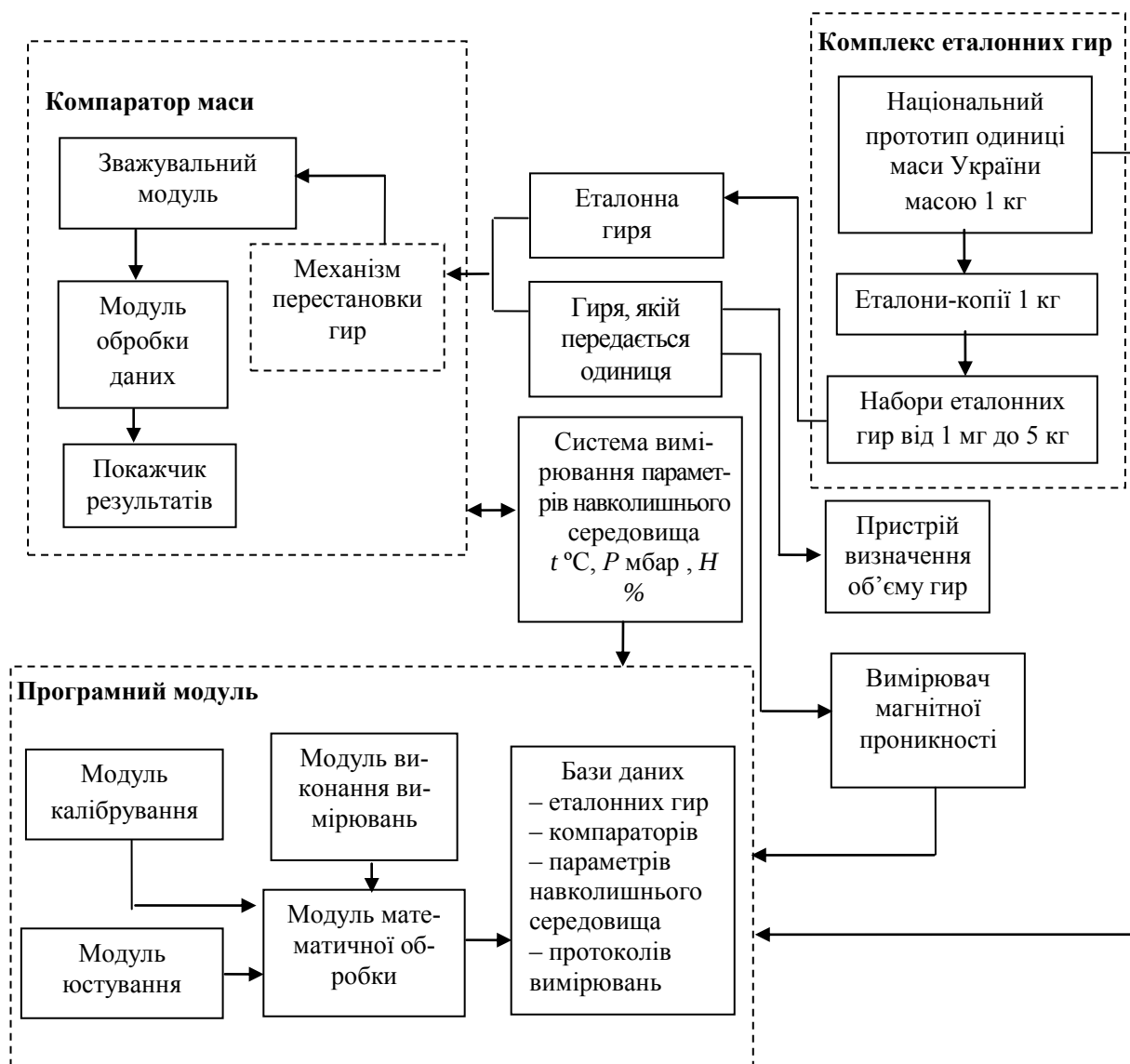


Рисунок 8.1 – Структурна схема первинного еталона України

Компаратор маси (зважувальний модуль) має у своєму складі:

- автоматизований термостатований компаратор на базі вагів Рупрехта;
- еталонні компаратори: C1000S фірми «Sartorius AG», Німеччина – для передавання одиниці в діапазоні від 100 г до 1 кг; CC50 «Sartorius AG» – з діапазоном від 1 мг до 50 г і CC5001 «Sartorius AG» – з діапазоном понад 1 кг;
- допоміжні пристрої.

Крім того, до складу еталона входять:

- основна і дублююча системи вимірювання параметрів довколишнього середовища;

- вимірювач об'єму гир і магнітної проникності матеріалу гир;
- програмний модуль, який містить у собі модулі виконання вимірювань, калібрування, юстування і математичної обробки, а також бази даних.

Розширена невизначеність відтворення маси 1 кг еталона становить ± 30 мкг ($3 \cdot 10^{-8}$). СКВ передавання одиниці в діапазоні до 100 г становить 2 мкг, у діапазоні до 1000 г – 5 мкг.

8.3. Методи відтворення природного кілограма

У процесі пошуку шляхів відтворення природного кілограма було досліджено кілька напрямків. На сьогодні лишилося два методи, які вважаються перспективними: метод ват-вагів («електричний» кілограм) і метод сталої Авогадро («атомний» кілограм). Розглянемо їх докладніше.

8.3.1. Відтворення за допомогою ват-вагів (електричний кілограм)

Суть методу полягає в порівнянні механічної і електричної енергії за допомогою так званих ват-вагів [45,46].

Принцип роботи ват-вагів полягає в наступному (рис. 8.2). Якщо помістити електропровідну рамку в перпендикулярне її площині магнітне поле, а потім змінювати площу перетину рамки, наприклад, рухаючи одне з його ребер і зафіксувавши положення інших, то через зміну магнітного потоку Φ у рамці виникне електрорушійна сила (ЕРС). ЕРС у рамці дорівнює падінню напруги у розриві провідника, що утворює рамку.

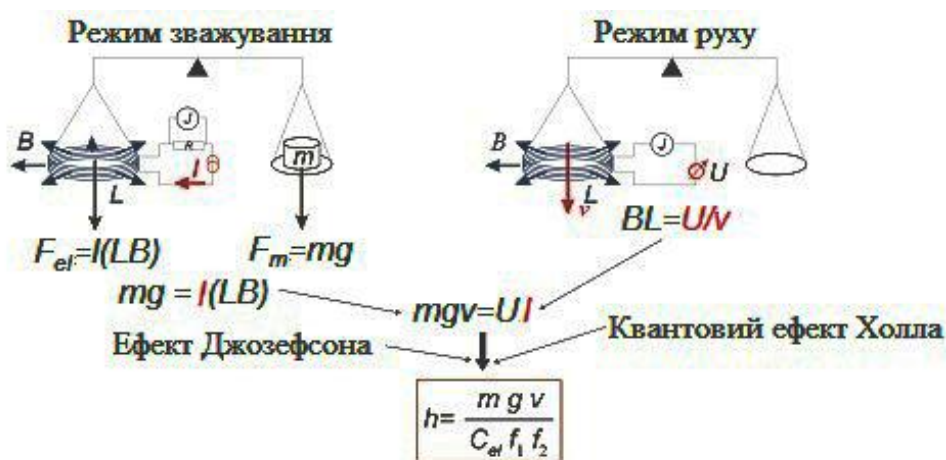


Рисунок 8.2 – Принцип роботи ват-вагів

Вимірювання ват-вагами складається з двох режимів – зважування і руху. Режим зважування подібний до того, який відбувається на аналітичних вагах. Із рис. 8.2 видно, що сила тяжіння mg урівноважена електромагнітною силою. Остання спричинена електричним струмом I , який тече по всій довжині L дроту, що міститься в магнітному полі B . Таким чином, за умови рівноваги масу можна визначити як

$$m = (BL/g)I. \quad (8.1)$$

У режимі зважування (BL/g) визначається відношенням m/I . У ват-вагах вимірюється прискорення вільного падіння g , а BL визначається при виконанні режиму руху. Як видно з рис. 8.2, BL – відношення електричної напруги U до швидкості v :

$$BL = U/v, \quad (8.2)$$

де $m = (U/vg)I$,
або

$$mvg = UI. \quad (8.3)$$

Ліва частина рівняння (8.3) – механічна потужність, а права частина – електрична потужність. Обидві потужності вимірюються у ватах, звідси і назва установки – «ват-ваги». Але (8.3) ще не містить фундаментальну сталу.

Вона з'являється при калібруванні електричної напруги та опору через квантові ефекти. Напругу калібрують на основі ефекту Джозефсона, а опір – на основі квантового ефекту Холла. Тоді вираз (8.3) набуває вигляду

$$m = h \frac{f_1 f_2}{vg} C_{el}, \quad (8.4)$$

де h – стала Планка; f_1 і f_2 – дві виміряних частоти при використанні ефекту Джозефсона; C_{el} – безрозмірний коефіцієнт.

У правій частині рівняння (8.4) з'являється зв'язок кілограма зі сталою h .

Тоді відношення h до маси ІРК набуває вигляду

$$\frac{h}{m(IPK)} = \left(\frac{vg}{f_1 f_2 C_{el}} \right) m. \quad (8.5)$$

Таким чином, у методі ват-вагів використовуються квантові ефекти Джозефсона і Холла, які, у свою чергу, спираються на сталі Планка h , елементарний заряд e . Елементарний заряд у виразі (8.4) скорочується і залишається стала Планка, тому цей метод також має назву простежуваності до сталої Планка або «електричного кілограма».

У ват-вагах, що вже діють у національних метрологічних інститутах США і Великої Британії, наразі заявлена невизначеність відтворення «електричного»

кілограма становить кілька одиниць 10^{-8} . Настільки низького рівня невизначеності вдалося досягти, застосувавши сучасну технологію виготовлення вузлів і компонентів установки. Наведемо стислий опис конструкції ват-вагів Національного інституту стандартів і технологій США (NIST), поданої на рис. 8.3.

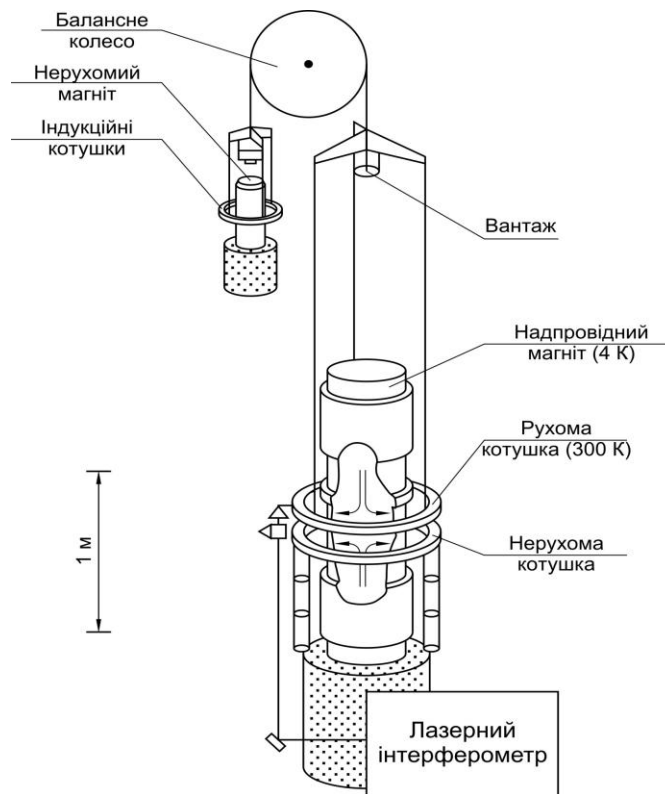


Рисунок 8.3 – Схема ват-вагів NIST (США)

Основний елемент пристрою – рамка зі струмом – являє собою дві пов'язані котушки: закріплену і рухома з кількістю витків по 2355 у кожній. Горизонтальне магнітне поле індукцією 0,1 Тл, яке несуттєво змінюється у вертикальному напрямку в робочій ділянці приладу, вдалося створити двома спрямованими назустріч один одному надпровідними магнітами. Верхню індукційну котушку підвішено на нитці, перекинутій через балансне колесо. На іншому кінці нитки знаходиться чашка з вантажем, урівноважуючим силу, що діє на рухома котушку. Підвішення рухомої котушки влаштовано таким чином, що забезпечує її переміщення точно у вертикальному напрямку на відстані до 100 мм, що відповідає куту повороту балансного колеса 10° . Спеціальні датчики контролюють не тільки вертикальне переміщення котушки, що вимірюється за допомогою трьох лазерних інтерферометрів, але і її відхилення від ідеальної траєкторії в усіх площинах. Інформація цих датчиків може враховуватися при визначенні поправки до результатів експеримен-

ту, а також використовується сервосистемою для придушення паразитних рухів котушки.

Зовнішній вигляд ват-вагів NIST наведено на рис. 8.4.



Рисунок 8.4 – Зовнішній вигляд ват-вагів

Остаточний результат експерименту отримують усередненням великої кількості одиничних вимірів. Так, на сьогодні найбільш точний результат порівняння електричної і механічної потужностей було отримано усередненням 989 вимірювань, проведених протягом чотирьох місяців. За оцінкою авторів, найбільший систематичний внесок у невизначеність припав на нестабільність коефіцієнта заломлення повітря, гістерезис балансної системи та вплив вирівнювання положення рухомої котушки.

Визначення кілограма при прийнятті цього методу буде мати вигляд:

Кілограм – одиниця маси, її розмір встановлюється через фіксацію точного чисельного значення сталої Планка $h = 6,626\,068\,96 \times 10^{-34}$ Дж с.

8.3.2. Відтворення через сталу Авогадро («атомний» кілограм) [47]

Із визначення моля для будь-якої речовини Y молярна маса дорівнює

$$M(Y) = N_A \cdot m(Y), \quad (8.6)$$

де $m(Y) = A_r(Y) m_u$ – маса атома речовини Y у кілограмах; $A_r(Y)$ – відносна атомна маса речовини Y ; m_u – атомна одиниця маси (а.о.м.), становить 1/12 частину молярної маси ізотопу вуглецю – ^{12}C .

Використовуючи (8.5) та (8.6), можна написати, що

$$N_A \cdot m_u = M_u, \quad (8.7)$$

де M_u – молярна масова стала; $M_u = 10^{-3}$ кг моль⁻¹, тобто

$$1 \text{ кг} = 10^3 \{N_A\} m_u = 10^3 \{N_A\} / 12, \quad (8.8)$$

$\{N_A\}$ – чисельне значення сталої Авогадро (число Авогадро).

Спрощено це можна подати таким чином. Число Авогадро N_A – кількість атомів, яка міститься в 0,012 кг ізотопу вуглецю – ¹²C. Якщо 0,012 кг містить N_A атомів, то в 1 кг повинно міститись X атомів, що дорівнює

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

Тоді визначення кілограма через сталу Авогадро має вигляд:

Кілограм – одиниця маси, її розмір встановлюється через фіксацію точного чисельного значення сталої Авогадро $N_A = 6,022141 \cdot 10^{23}$.

Підкреслимо: при визначенні кілограма через значення маси якоїсь фундаментальної частинки, наприклад, атома вуглецю – ¹²C, електрона, протона тощо, необхідно визначити з відносною невизначеністю близько 10⁻⁸ число Авогадро. Пріоритетним напрямком робіт для розв’язання цієї задачі було використання кристалів кремнію надвисокої чистоти і бездефектної структури та методу визначення щільності кристалу за допомогою рентгенівських променів (XRCD-методу). Для цього в межах Європейського союзу було відкрито проект SIMUS, в якому проводилося вирощування кристалів кремнію-28, його обробка у вигляді кулі, точне вимірювання його діаметра. Молярну масу кремнію $m(^{28}\text{Si})$ визначали за допомогою мас-спектрометра, міжатомну відстань – шляхом комбінованого використання рентгенівської та оптичної інтерферометрії.

Розглянемо експеримент із визначення сталої Авогадро, як визначення маси атома кремнію-28, $m(^{28}\text{Si})$ у кілограмах. Завдання полягало в порівнянні двох мас: $m(X) = a$ маси сфери зі стабільного ізотопу ²⁸Si та маси ІПК (рис. 8.5). Тоді можна записати: $m(X)/m(\text{ІПК}) = a/\text{кг}$.

Виміряне значення $a/\text{кг}$ становило близько $5 \cdot 10^{-26}$ при здійсненні цього звірення з відносною невизначеністю, яка набагато менша, ніж, наприклад, для еталонних гир 1 кг класу E₁.

Відношення $(^{28}\text{Si})/m(\text{ІПК})$ визначалося з цього експерименту таким чином:

$$\frac{m(^{28}\text{Si})}{m(\text{ІПК})} = \left(\frac{1}{n}\right) m/\text{кг}. \quad (8.9)$$

Експеримент полягав у вимірюванні m/n з високою точністю, а це надзвичайно складне завдання. В результаті цього проекту було визначено се-

реднє m/n у двох різних кристалічних сферах зі стандартною відносною невизначеністю $3 \cdot 10^{-8}$.

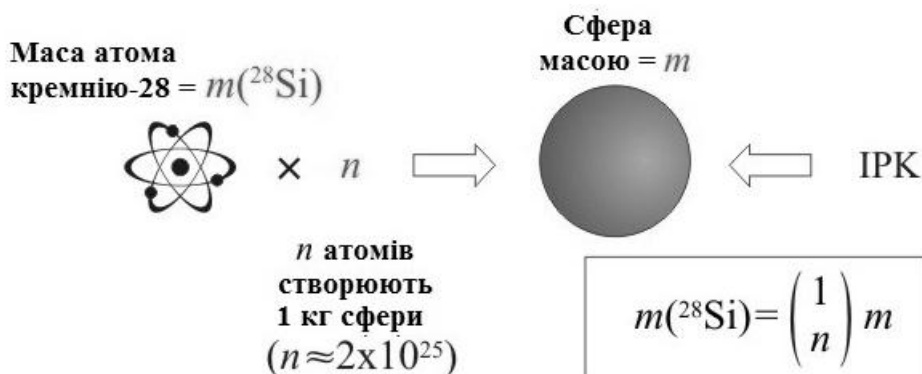


Рисунок 8.5 – Зв'язок маси атома кремнію-28 з IPK

В існуючій системі SI величина $M(^{12}\text{C})$ визначається точно, як 0,012 кг/моль. Таким чином, вимірювання $m(^{12}\text{C})$ з відносною невизначеністю $u_r(m(^{12}\text{C}))$ може бути описано як вимірювання N_A , що має таку ж відносну невизначеність. Із результатів вимірювань в атомній фізиці співвідношення маси $m(^{28}\text{Si})/m(^{12}\text{C})$ вже відомо з несуттєвою невизначеністю. Тому вимірювання $m(^{28}\text{Si})$ є водночас вимірюванням значення N_A .

За допомогою цих експериментів сталу Авогадро було встановлено з невизначеністю близько $3 \cdot 10^{-8}$, що робить цей шлях перевизначення кілограма достатньо конкурентоспроможним.

Хоча 24-ю CGPM (Резолюція 1) перевагу віддано методу ват-вагів, метод простежуваності до сталої Авогадро не втрачає свого значення для метрології, як другий незалежний метод.

8.4. Умови, які необхідно виконати для перевизначення кілограма

8.4.1. Забезпечення неперервності вимірювань маси і пов'язаних з нею величин

Раніше підкреслювалось, що перевизначення кілограма – дуже відповідальне рішення, оскільки від цього залежить збереження необхідної точності і неперервності вимірювань як маси, так і ряду інших величин. Тому CIPM і його робоча група по масі розробили умови і процедури введення нового визначення, аби не допустити ризиків. Вони зводяться до того, що повинна бути підтверджена простежуваність прототипів BIPM та всіх

еталонів, які базуються на методах «ват-вагів» та сталої Авогадро, до ІРК (рис. 8.6).

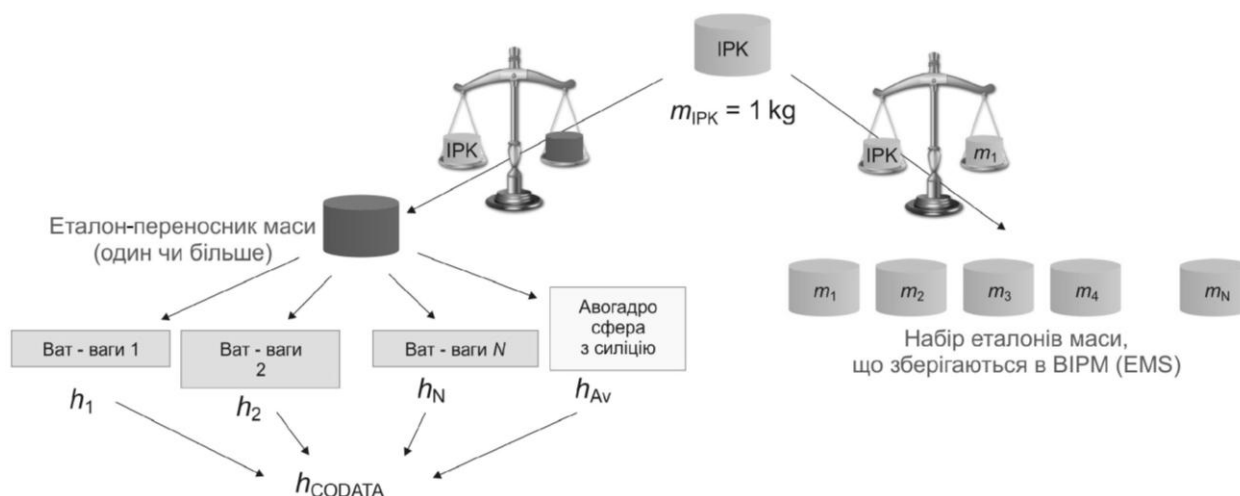


Рисунок 8.6 – Незалежні експерименти з визначення кілограма

Також було рекомендовано провести спеціальні заходи для сприяння поширенню перевизначеного кілограма.

8.4.2. Забезпечення поширення перевизначеного кілограма

Процедуру передачі розміру одиниці маси від природних еталонів маси, які ґрунтуються на сталих Планка (ват-ваги) або Авогадро (сфера з монокристалом кремнію) можна подати таким чином (рис.8.7). Відбувається порівняння семи артефактів МБМВ (міжнародного прототипу кілограма (ІРК) і шести його копій) з природними еталонами, після чого розмір кілограма передається національним прототипам. Так забезпечується метрологічна простежуваність національних прототипів до сталих Планка і Авогадро.

У процедурі передачі розміру кілограма є *суттєвий момент*. В існуючій системі, де первинним еталоном є ІРК, передавання одиниці проводиться в *атмосферному повітрі* і вводиться поправка на його виштовхуючу силу (що є джерелом похибки). Але передача одиниці від ват-вагів або кремнієвих сфер має відбуватися в умовах *вакууму*, тому і передача одиниці від міжнародного прототипу кілограма (ІРК) національним прототипам також буде проводитись в умовах вакууму. Звідси виникає нагальна необхідність – країнам, які мають платино-іридієві кілограми, переходити на *вакуумне зважування*. Це дозволить зменшити похибку передачі, але вакуумні компаратори мають лише 16 країн світу.

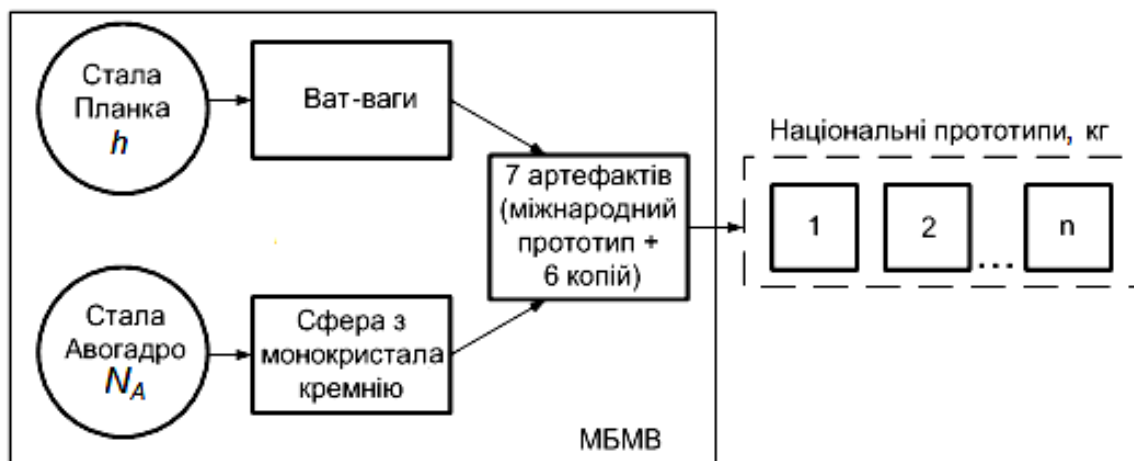


Рисунок 8.7 – Система передачі розміру одиниці маси на основі нового визначення

Процедура розповсюдження кілограма до і після перевизначення ілюструється рис. 8.8.

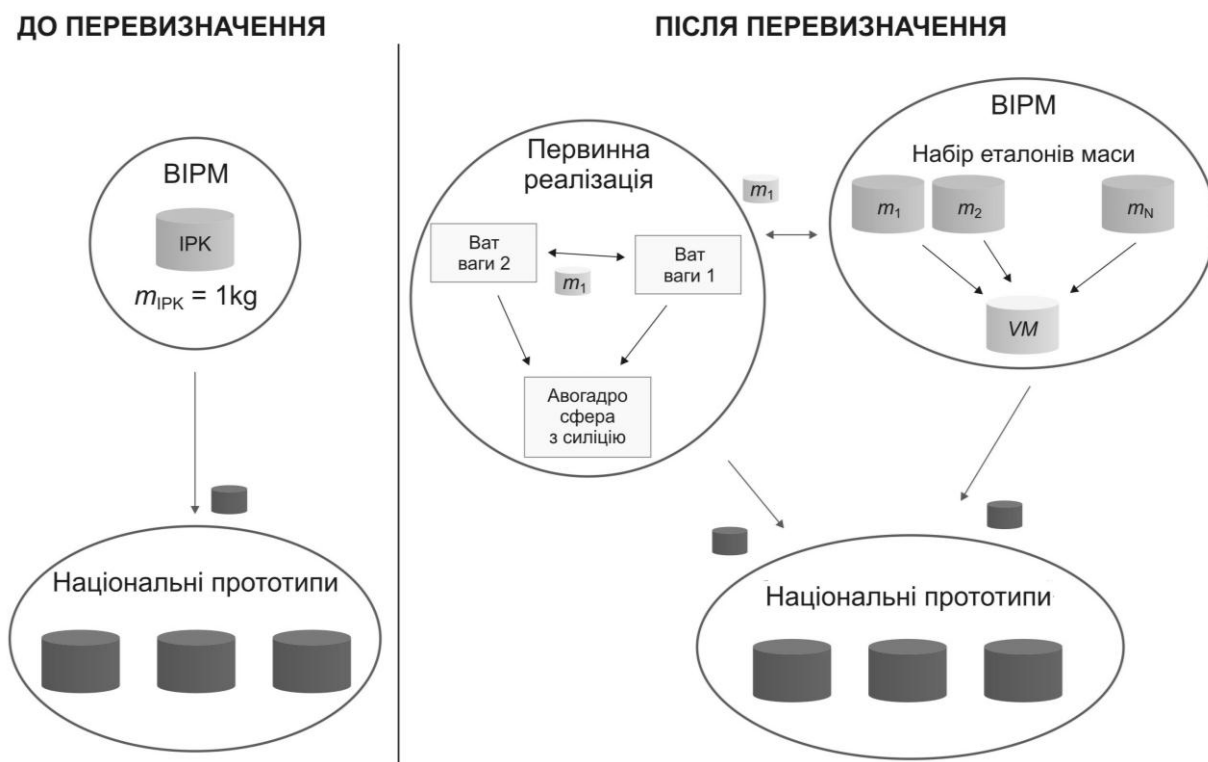


Рисунок 8.8 – Схеми розповсюдження кілограма

Для вирішення проблеми розповсюдження нового визначення кілограма і відпрацювання відповідної методики у МБМВ створена спеціальна лабораторія, в якій зібрано «банк вихідних еталонів» з еталонів МБМВ і еталонів НМІ [48,49].

До цієї сукупності входять 12 вихідних еталонів МБМВ + 4 пакети з чотирьох гир кожний:

- пакет 1: 4 платино-іридієвих циліндри по 1 кг;
- пакет 2: 4 циліндри із нержавіючої сталі по 1 кг;
- пакет 3: 4 сфери з природного кремнію по 1 кг;
- пакет 4: 1 платино-іридієва гиря + 1 кремнієва гиря + 2 гирі з нержавіючої сталі, кожна гиря масою 1 кг, але різного об'єму.

Процедура дослідження різних еталонів маси включає:

- 1) порівняння стабільної маси еталонів із різних матеріалів;
- 2) вимірювання маси в різних середовищах зберігання: газоподібному аргону; газоподібному азоту; вакуумі; повітрі;
- 3) порівняння стабільності маси за різних умов зберігання для сфер з природного кремнію і платино-іридієвих гир.

У ВІРМ для цього створено спеціально обладнану лабораторію, яка містить генератори азоту, балони з аргоном, аналізатори кисню, вологості, вуглецю, хроматограф, а також контейнери для зберігання еталонів маси. Контейнери забезпечують постійний потік газу, обладнані клапанами і перепускними патрубками, системами контролю чистоти газів і параметрів середовища, мають можливість працювати в автономному і ручному режимах.

На теперішній час усе устаткування вже повністю введено в експлуатацію і відпрацьовуються численні експерименти для всебічного дослідження сукупності еталонів, усіх складових невизначеності та впливових чинників.

Використання великої кількості різних еталонів маси, зважування в різних газах і вакуумі – все це забезпечує найвищу достовірність і надійність досліджень, хоч і створює певні труднощі під час реалізації експериментів.

Наведені дані показують, наскільки складними і дорогими є процедури з введення нового визначення кілограма, розповсюдження еталонів, що простежуються до нового визначення, і, врешті, забезпечення єдності вимірювання маси у світі на необхідному рівні.

Немає сумнівів, що перевизначення кілограма є бажаним з точки зору як фундаментальної фізики, так і метрології. Очікується, що до кінця 2017 р. всі заплановані заходи будуть виконані і з 2018 р. нове визначення кілограма буде введено в дію.

8.5. Одиниця кількості речовини – моль і стала Авогадро

8.5.1. Передумови і суть перевизначення моля

Одиниця кількості речовини – моль – була затверджена як сьома основна одиниця SI у 1977 р. рішенням 14-ї CGPM і сформульована так: *«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 описі припускається, що кілограм визначений незалежно.

Історія появи цієї одиниці така. У 1811 р. А. Авогадро, спираючись на досліди Ж. Л. Гей-Люссака, висловив гіпотезу, що однакові об'єми різних газів за однакового тиску містять 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 впливає з переконання, що маса будь-якої молекули даної речовини завжди постійна. Звідси виходило трактування 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 впливає, що $M(^{12}\text{C}) = 0,012 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} = 12 M_u$, де, як показано вище, $M_u = 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$ – стала молярної маси. Звідси впливає, 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 [44].

Два варіанти нового визначення моля, що ґрунтуються на фіксації сталої Авогадро точно $6,02214 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$, наведено в [44]. Ці визначення не тільки зберігають основне визначення N_A як числа частинок у молі й пов'язують моль із його точним значенням $N_A = 6,02214 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$, що не накладає жодних обмежень на кілограм, але і зберігають основне співвідношення між моляр-

ною масою речовини Y і масою його структурного елементу. До того ж, наявне визначення моля (моль^{-1}) чітко показує, що моль – це одиниця кількості структурних елементів, яка не має жодного відношення до маси.

8.5.2. Наслідки перевизначення моля

При існуючому сьогодні в SI визначенні моля кількість речовини – це деяка *невідомо 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 ототожнено 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 $2 \cdot 10^{-9}$. Відзначимо також, що нове визначення моля хоча і не змінює співвідношення між молярною масою речовини, сталою Авогадро і масою речовини, але може вплинути на визначення деяких величин: молярної масової сталої, атомної масової сталої та інших. Проте, у всіх практичних хімічних вимірюваннях, де застосовується моль, молярну масу необхідно, як і раніше, обчислювати за відомою формулою

$$m(Y) = A_r(Y)M_u, \quad (8.10)$$

де $A_r(Y)$ – відносна атомна маса речовини; Y , M_u – молярна масова стала.

Таким чином, нове визначення моля не потребує жодних 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*.

Висновки

- При встановленні метричної системи мір за одиницю маси був прийнятий кілограм, що дорівнював масі 1 дм^3 чистої води при температурі її найбільшої густини. На основі послідовних зважувань за спеціальною методикою був виготовлений прототип кілограма, спочатку платиновий, пізніше платино-іридієвий. Цей прототип став міжнародним еталоном кіло-

грама (1901 р.) і залишається ним на цей час. Відносна похибка, яка була приписана еталону (СКВ), складає $2 \cdot 10^{-9}$.

- Головними недоліками існування еталона кілограма у вигляді прототипу є:

- неможливість оцінки стабільності і дрейфу еталона;
- незручність, трудомісткість, дорожня система передачі одиниці від єдиного еталона;

- ризик краху всієї шкали маси в разі втрати прототипу;

- залежність від кілограма ряду основних і похідних одиниць.

- Багато років провідні метрологічні організації світу працюють над створенням природного еталона кілограма, тобто над визначенням його розміру через якусь фізичну сталу. На сьогодні найбільш перспективними напрямками є простежуваність до сталої Планка («електричний» кілограм) або до сталої Авогадро («атомний» кілограм).

- Метод з використанням сталої Планка полягає у зрівноваженні електричної і механічної потужностей за допомогою спеціальних ват-вагів, установленні електричної потужності з використанням мір Джозефсона і Холла, вимірюванні прискорення вільного падіння g у місці проведення експерименту. Тоді маса буде визначена через джозефсонівську частоту $f_{\text{Дж}}$ і сталу Планка h . Орієнтовна невизначеність відтворення кілограма цим методом складає $5 \cdot 10^{-8}$.

- Метод з використанням сталої Авогадро полягає у підрахунку кількості атомів, які містяться у близькій до кілограма масі ізотопу вуглецю-12. Якщо, за визначенням, в 0,012 кг міститься N_A атомів, то в 1 кг повинно бути $X = N_A / 0,012$ кг (атомів). Підрахунок числа атомів проводиться за допомогою так званого XRCD-методу. Орієнтовна невизначеність відтворення кілограма цим методом також складає $5 \cdot 10^{-8}$.

- На сьогодні (2017 р.) ГКМВ схиляється до методу визначення кілограма через сталу Планка, але досягнутої точності, стабільності і готовності апаратури недостатньо для прийняття остаточного рішення.

- Для розповсюдження нового визначення кілограма розроблена спеціальна програма, завдання якої – уникнути непередбачених похибок і ускладнень.

- Перевизначення моля дещо змінить його фізичну суть, але не приведе до якихось змін у сучасній метрологічній практиці.

Контрольні питання

1. Чи адекватні поняття *маси і ваги*? Обґрунтуйте відповідь.
2. Чи однаково буде важити деякий предмет на Землі і на Місяці? А що буде з масою цього предмета?
3. Сформулюйте діюче на сьогодні (2017 р.) визначення кілограма в SI.
4. Які недоліки має існування еталона кілограма у вигляді прототипу?
5. Які напрямки досліджень зі створення природного еталона кілограма ви знаєте?
6. Що ми розуміємо під *електричним кілограмом*? Яка ФФС покладена в основу його визначення?
7. Для чого використовуються ват-ваги в одному з методів відтворення природного кілограма?
8. У чому полягає суть методу створення *атомного* кілограма?
9. Який зв'язок існує між кілограмом і *числом Авогадро*?
10. Які позитивні результати очікуються в разі створення природного еталона кілограма?
11. Які наслідки очікуються від перевизначення кілограма ?
12. Як планується розповсюджувати нове визначення кілограма?
13. Як змінюється фізична суть моля при його перевизначенні?
14. Які наслідки очікуються від перевизначення моля?

Розділ 9

ТЕМПЕРАТУРНІ ВИМІРЮВАННЯ І СТАЛА БОЛЬЦМАНА

9.1. Історія питання

Температура навколишнього середовища, предметів є *активною* величиною. Це вносить істотні особливості в її вимірювання, оскільки визначення активної величини, як правило, базується на взаємодії якихось процесів.

Особливість термодинамічної температури полягає також у тому, що вона є неадитивною величиною. Тому, якщо для еталонів довжини, маси й інших адитивних величин можна спиратися на одне відтворене значення одиниці, то для температури відтворення однієї еталонної точки не дозволить точно встановити інші температурні точки. Отож, для відтворення одиниці температури необхідно здійснити точне відтворення багатьох температурних точок, сукупність яких утворить температурну шкалу [29].

Вимірювання температури T з моменту винаходу термометра ґрунтувалися на застосуванні тієї чи іншої термометричної речовини, що змінює свій об'єм або тиск при зміні температури. Відлік температури в цих випадках здійснюється за рівномірною шкалою

$$T = T_0 + (\theta - \theta_0) \frac{T_1 - T_0}{\theta_1 - \theta_0},$$

де $\theta, \theta_0, \theta_1$ – відповідно відліки за шкалою термометра і положення реперних точок T_1, T_0 . Як реперні (опорні) обирались точки, що відповідали температурам переходу термометричної речовини з одного агрегатного стану в інший (температури плавлення і кипіння). У цих точках температура речовини залишається постійною увесь час, поки здійснюється перехід.

У 1641 р. був створений перший спиртовий термометр, а у 1655 р. – ртутний. У 1665 р. Християн Гюйгенс і Роберт Гук запропонували точки плавлення льоду і кипіння води як основні для термометра. Пізніше були запропоновані температурні шкали. Усі вони ґрунтувалися на рівномірному розподілі інтервалу між реперними точками на визначену кількість одиниць (градусів).

У 1710 р. німецький фізик Габріель Даніель Фаренгейт створив перший

практично придатний спиртовий, а у 1714 р. – ртутний термометри, в яких за 0° була взята найнижча температура взимку 1709 р., а за 12° – температура тіла здорової людини. Згодом ця шкала була тричі послідовно розділена навпіл, у результаті чого у 1724 р. Фаренгейт запропонував для побудови термодинамічної шкали дві точки: температуру суміші льоду із сіллю і нашатирем, що він позначив 0, і температуру тіла здорової людини, що він позначив числом 96. За одиницю температури – градус – було прийнято 1/180 інтервалу між точкою плавлення льоду (32 °F) і точкою кипіння води (212 °F) за цією шкалою.

Шкала, запропонована французьким ученим Рене Антуаном Реомюром (1730 р.), має дві постійні точки, більш зручні для відтворення: точку танення льоду 0 і точку кипіння води 80°.

Шкала, запропонована в 1742 р. шведським астрономом Андерсом Цельсієм, має ті ж реперні точки, що і шкала Реомюра, тільки інтервал між ними поділяється на 100 градусів.

Показання кожного з термометрів залежали від роду термометричної речовини й умов її теплового розширення.

Дослідження довели, що у природі не існує фізичних властивостей, пов'язаних лінійно з температурою. Тому зазначеним методом можна побудувати стільки шкал, скільки обрано термометричних речовин. Збігаючись в основних реперних точках T_0, T_1 , ці шкали давали розбіжні значення температур як усередині діапазону $[T_0, T_1]$, так і поза ним.

Англійський вчений У. Томсон (Кельвін) показав, що можна встановити температурну шкалу, яка не залежить від роду термометричної речовини. Єдиною реперною точкою в ній пропонувалося зробити потрібну точку води (точка рівноваги води у твердій, рідкій і газоподібній фазах).

З 1960 р. (з уточненням 1967 р.) МКМВ одиницею термодинамічної температури прийнятий кельвін – 1/273,16 частина термодинамічної температури потрібної точки води. Припустимим є вираження термодинамічної температури у градусах Цельсія.

Потрібна точка води може бути відтворена з похибкою 0,0001 °C. Схема посудини, що відтворює потрібну точку води, зображена на рис. 9.1, а її зовнішній вигляд – на рис. 9.2. За температуру реперної точки була прийнята температура 273,16 К точно. Уся шкала має будуватися на підставі формули

$$T_2 = T_1 Q_2 / Q_1,$$

де Q_1 – кількість тепла, що одержує будь-яке тіло від нагрівача; Q_2 – кіль-

кість тепла, що тіло віддає охолоджувачу при оберненому циклі Карно; T_1 і T_2 – температури нагрівача й охолоджувача, причому температурі T_2 надають значення потрійної точки води. У цьому випадку для визначення температури T_1 необхідно знати лише відношення кількостей теплоти.

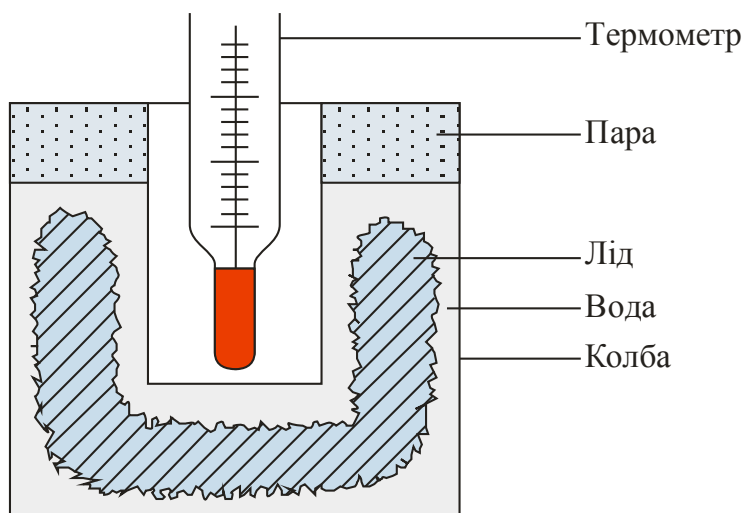


Рисунок 9.1 – Схема посудини, що відтворює потрійну точку води



Рисунок 9.2 – Пристрій, що відтворює потрійну точку води

Відтворення термодинамічної шкали температур пов'язане із значними труднощами. Тому IX Генеральна конференція з мір та ваг у 1948 р. установила **практичну** температурну шкалу, відтворену за визначеними сталими реперними точками. Температура в реперних точках визначається газовим 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 температурних точок, термодинамічна температура яких ретельно виміряна і зафіксована за допомогою первинних термометрів. При цьому під первинними (термометрами) розуміються термометри, рівняння стану яких не містить сталих, що залежить від температури. Прикладами таких пристроїв можуть служити газові, акустичні, шумові термометри і термометри повного випромінення.

За допомогою опорних точок градуюються вторинні прилади, які служать для інтерполяції між опорними точками і побудови «практичної» шкали. Прикладом вторинного термометра є платиновий термометр опору, який на цей час широко використовується як інтерполуючий прилад. Практична шкала, строго кажучи, не збігається з термодинамічною, і рівень цієї невідповідності залежить від стану вимірюваної техніки і теорії в цій галузі. Тому удосконалення в цих обох областях ведуть за собою перегляд практичної температурної шкали.

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 у 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 $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ до потрійної точки водню $13,81\text{ K}$.

З розвитком методів і засобів температурних вимірювань виникла необхідність у подальшому удосконаленні практичної температурної шкали. Так народилась шкала 1990 р., яка одержала назву міжнародної температурної шкали МТШ-90. У 2000 р. вона була доповнена тимчасовою низькотемпературною шкалою ТНТШ-2000. Ця шкала діє і до сьогодні, тому розглянемо її докладніше.

9.2. Міжнародна температурна шкала МТШ-90

МТШ-90 охоплює область від 0,65 К до найвищої температури, практично доступної вимірюванню відповідно до закону Планка для монохроматичного випромінювання. МТШ-90 побудовано таким чином, щоб у всьому діапазоні температур числові значення T_{90} мінімально відрізнялися від найбільш точних значень T , одержаних до 1990 р. Порівняно з прямими вимірюваннями термодинамічних температур, вимірювання T_{90} виконуються легше, точніше і з високим ступенем відтворюваності. У діапазоні температур від 0,65 до 1357 К для відтворення реперних точок МТШ-90 використовуються методи контактної термометрії, за вищих температур – методи оптичної термометрії.

9.2.1. Контактна термометрія

В інтервалі від 0,65 до 5 К температура T_{90} визначається через залежність тиску насиченої пари ^3He і ^4He від температури. Між 3,0 К і потрійною точкою неона (24,5561 К) температура T_{90} визначається за допомогою гелієвого газового термометра, відградуйованого при трьох експериментально відтворюваних температурах, яким приписані числові значення (основні реперні точки), і установлених інтерполяційних формул.

Між потрійною точкою рівноважного водню (13,8033 К) і точкою тверднення срібла (961,78 °С) температура T_{90} визначається за допомогою платинових термометрів опору, відградуйованих у певних основних реперних точках із використанням установлених інтерполяційних формул.

Вище точок тверднення срібла (961,78 °С) температура T_{90} визначається відповідно до закону Планка і за допомогою реперної точки. Основні реперні точки реалізуються як певні стани фазних рівноваг (дво- або трифазних) деяких чистих речовин, які характеризуються високою відтворюваністю і стабільністю температури. До двофазних рівноважних станів належать точки кипіння, плавлення і тверднення, до трифазних – потрійна точка речовини.

Основні реперні точки МТШ-90 наведено в табл. 9.1., до неї надаються поправки, що враховують вплив тиску на температуру цих точок унаслідок різних причин.

9.2.2. Оптична термометрія

В оптичній термометрії (термометрії за випроміненням), на відміну від контактної термометрії, яка базується на термоелектричному перетворюванні або термоперетворюванні опору, можна використовувати рівняння, які пов'язують термодинамічну температуру з вимірюваною величиною (в даному випадку спектральною яскравістю). Це можливо тому, що теплове випромінення, яке існує всередині замкненої порожнини (випромінення чорного тіла), залежить тільки від температури стінок порожнини і зовсім не залежить від її форми або устрою за умови, що розміри порожнини набагато більші, ніж довжина хвилі, за якої проводять вимірювання.

Таблиця 9.1 – Основні реперні точки МТШ-90

Номер реперної точки	Температура		Речовина	Тип точки
	T_{90} , К	t_{90} , °C		
1	від 3 до 5	від –270,15 до –268,15	He	P
2	13,8033	–259,3467	p-H ₂	ТР
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: P – тиск насиченої пари; ТР – потрійна точка (температура рівноваги між твердою, рідкою фазами і парами); Г – газовий Р термометр; П і ТТ – точки плавлення і тверднення відповідно (температура рівноваги рідкої і твердої фаз за тиску 101325 Па)

Відповідно до Положення про МТШ-90 одиниця температури Кельвіна в області вище 1234,93 К (точка тверднення срібла) відтворюється безконтактними методами на основі співвідношення, що витікає із закону Планка:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}(T_{90}(x))} = \frac{\exp[c_2/\lambda T_{90}(x)] - 1}{\exp[c_2/x T_{90}(x)] - 1}, \quad (9.1)$$

де $T_{90}(x)$ – температура фазового переходу тверднення однієї із трьох реперних точок – срібла, золота або міді; $L_{\lambda}(T_{90})$ і $L_{\lambda}(T_{90}(x))$ – спектральні густини енергетичної яскравості випромінювання чорного тіла на довжині хвилі λ (у вакуумі) при температурах T_{90} і $T_{90}(x)$ відповідно; $c_2 = 0,014388$ мК – стала випромінювання.

Таким чином, процес реалізації температурної шкали засобами радіаційної термометрії базується на створенні стану термодинамічної рівноваги між твердою і рідкою фазами чистого металу, який має безпосередній контакт зі стінками порожнини моделі абсолютно чорного тіла (АЧТ).

Для реєстрації потоку випромінювання спектральна густина енергетичної яскравості якого L_{λ} однозначно пов'язана з температурою $T_{90}(x)$ реперної точки в момент фазового переходу, а також для наступної процедури екстраполяції шкали від даної температури $T_{90}(x)$ в область більш високих температур, необхідне застосування безконтактного інтерполяційного інструмента, принцип дії якого дозволяє трансформувати виміряну величину відношення монохроматичних яскравостей (ліва частина рівняння (9.1)) у температурний еквівалент.

Для пірометрії МТШ-90 дозволяє вибір із трьох альтернативних опорних точок тверднення: срібла, золота або міді. Дослідна метрологічна практика показала, що при побудові шкали високих температур згідно з рівнянням (9.1) основною вимірювальною операцією є встановлення рівності яскравостей, яке можна виконати значно точніше, ніж безпосереднє вимірювання відношення двох нерівних яскравостей. Вимірювання за принципом зрівнювання яскравостей не потребує лінійного пристрою.

9.2.3. Термометрія в інфрачервоній області спектра

Широкого розвитку в наш час одержала радіаційна термометрія в інфрачервоній області спектра (*ІЧ-термометрія*). Число приладів інфрачервоної радіаційної термометрії, які випромінюють температуру в діапазоні $(-50 - 1000$ °С), швидко збільшується. Все це привело до необхідності удосконалення метрологічного забезпечення даної області вимірювання, оскільки існуючі засоби і методи не задовольняють необхідним вимогам.

Для метрологічного забезпечення радіаційної термометрії, як правило, використовується схема, що ґрунтується на випромінювачах типу АЧТ з еталонними платиновими термоперетворювачами опору. Аналіз показує, що такий підхід не може забезпечити підвищених вимог до точності радіаційних вимірювань, оскільки реалізація температурної шкали істотно залежить від варіації властивостей платинових термоперетворювачів опору при зміні температури.

Тому в останні роки у провідних метрологічних центрах розвивається інший підхід, який полягає в побудові радіаційної температурної шкали, симетрично контактній температурній шкалі, а саме, використовуються абсолютно чорні тіла на реперних точках МТШ-90, а проміжні температури між реперними точками визначаються інтерполяцією за допомогою пірометра-компаратора. Вище точки тверднення срібла МТШ-90 будується з використанням АЧТ на реперній точці срібла (або золота чи міді) як еталонного випромінювача.

Для побудови шкали в області високих температур виконується екстраполяція за допомогою радіаційного пірометра, який має високу лінійність. Наближення, що базується на реперних точках, має значно менші похибки калібрування і задовольняє необхідним вимогам для метрологічного забезпечення радіаційної термометрії.

Побудова шкали за допомогою монохроматичного пірометра потребує калібрування пірометра в точці тверднення срібла (або золота чи міді), визначення спектральної чутливості пірометра і реалізації шкали відношення яскравостей, яка, у свою чергу, потребує вимірювання нелінійності приймача.

Монохроматичні пірометри, які використовуються для реалізації шкали, є в більшості випадків лише фотоелектричними компараторами яскравостей, тобто слугують для передачі випромінення чорного тіла при еталонній температурі до випромінення АЧТ змінних температур.

Температурна шкала може будуватися різними способами. Основними є метод подвоєння яскравостей і метод, що ґрунтується на використанні лінійного фотоприймача, який одержав в останній час широкий розвиток.

9.3. Первинні еталони одиниці температури і еталони України

У загальному вигляді первинний еталон складається з пристроїв, що реалізують наведені в табл. 9.1 реперні точки, а також платинових термометрів опору. Останні відіграють роль інтерполяційних приладів, які здійснюють прив'язку всієї шкали температур до цих реперних точок. Проілюструємо принцип побудови еталонів температури на прикладі еталонів України [50].

В Україні температурна шкала МТШ-90 підтримується чотирма державними еталонами з діапазонами температур 13,803–273,16 К; 273,16–1357,77 К; 1357,77–2800 К; 692,67–1234,93 К.

9.3.1. Еталон у діапазоні низьких температур: 13,803 – 273,16 К

Еталон містить установки, що відтворюють температури потрібних точок ртуті, аргону, кисню, неону і водню. Узгодження точок здійснюється за допомогою інтерполяційного приладу – набору еталонних платинових термометрів. Передача розміру одиниці здійснюється спеціальним низькотемпературним компаратором. Невиключена систематична похибка $\theta_0 = (1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3})$ К, середньоквадратичне відхилення $S_0 = (5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3})$ К, розширена невизначеність $U = (2 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3})$ К.

9.3.2. Еталон у діапазоні 273,16 – 1357,77 К

Еталон відтворює температуру потрібної точки води (основний еталон), плавлення галію, тверднення індію, олова, цинку, алюмінію і міді. До складу еталона входить також вимірювальний міст і набір платинових термометрів опору. Невиключена систематична похибка $\theta_0 = (2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3})$ К, середньоквадратичне відхилення $S_0 = (2 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3})$ К, розширена невизначеність $U = (2,3 \cdot 10^{-4} - 5,5 \cdot 10^{-3})$ К.

9.3.3. Еталон у діапазоні 1357,77 – 2800 К

Основу еталона високих температур становить апаратура, що реалізує точку фазового переходу чистої міді 1357,77 К. Шкала температур до 2800 К здійснюється оптичними методами, що базуються на законі Планка. Основною вимірювальною операцією під час екстраполяції температурної шкали є компарування яскравостей.

Складовими елементами комплексу апаратури еталона є випромінювач типу абсолютно чорного тіла на базі фазового переходу тверднення міді, еталонний фотоелектричний спектрокомпаратор та подвоювач яскравостей.

Побудована таким чином шкала (за умови довжини хвилі 656 нм) досягає температури близько 1600 °С.

До вищих значень температури $\cong 2300$ К у випадку $\lambda = 656$ нм шкалу будують за допомогою поглиначів, а до температур $\cong 2800$ К шкала реалізується у більш коротких (відносно 656 нм) довжинах хвиль. Невиключена систематична похибка $\theta_0 = (0,1-0,5)$ К, середньоквадратичне відхилення $S_0 = (0,2-1,3)$ К, розширена невизначеність $U = 3$ К.

9.3.4. Еталон температури в ІЧ-діапазоні 692,64 – 1234,93 К

Ураховуючи особливості розвитку ІЧ-термометрії і потреби науки і техніки в ННЦ «Інститут метрології» був створений первинний еталон одиниці температури в інфрачервоній області спектра.

До складу еталона входить комплекс засобів вимірювальної техніки та обладнання:

- випромінювач типу абсолютно чорного тіла на базі фазових переходів тверднення чистих металів: Zn, Al, Ag (далі за текстом – ВФПЧМ);
- випромінювач типу абсолютно чорного тіла зі змінною температурою в діапазоні від 692,67 до 1234,93 К (далі за текстом ВТТШ);
- еталонний ІЧ пірометр-компаратор;
- додаткові пристрої.

Еталон має такі метрологічні характеристики: невиключена систематична похибка 0,5 К, середньоквадратичне відхилення 0,8 К, розширена невизначеність $U = 1,65$ К.

Підкреслимо, що оскільки відтворення значень температури забезпечується в еталонах не прямими вимірюваннями за допомогою «первинних термометрів» (які вимірюють термодинамічну температуру), а за основними реперними точками, *величина, яка вимірюється первинними еталонами, є не термодинамічна температура, а температура у кельвінах T_{90} або градусах Цельсія t_{90} , визначених за МТШ-90.*

9.4. Шлях до нового визначення кельвіна

9.4.1. Передумови перевизначення

Одиниця температури T , кельвін, на цей час визначена через температуру потрійної точки води, тобто пов'язана з властивостями матерії. Хоча потрійна точка води і є природним інваріантом, проте її термодинамічна температура до певної міри залежить від вмісту домішок і ізотопного складу даного об'єму води. Розбіжність $T_{ТТВ}$ для різних реалізацій потрійної точки не перевищує 50 мкК, проте невизначеності усіх інших реперних точок, які визначають МТШ-90, будуть значно більше [44]. Саме ця обставина стала головною передумовою до перевизначення кельвіна. Але є і інші причини.

Вимірювання температури, що ґрунтуються на міжнародних температурних шкалах, МТШ-90 зокрема, в порівнянні з прямими вимірюваннями термодинамічної температури, здійснюються легше і добре відтворюються. Проте, МТШ-90 властиві і деякі недоліки. Зокрема, при вимірюваннях вищої точності можуть виникати помітні відмінності між результатами вимірювань, виконаними для тієї самої температури, але відповідно до різних визначень. Навіть при використанні одного визначення відмінності можуть виникати при використанні різних інтерполюючих інструментів між опорними точками. Ці ефекти відомі в температурній метрології як «відсутність єдиності» і «неузгодженість діапазонів».

МКМВ протягом багатьох років мав довгострокову мету визначення всіх основних одиниць SI через ФФС, щоб виключити залежність від властивостей будь-яких артефактів або матеріалів і забезпечити довгочасову стабільність одиниць.

У 2005 р. у Консультативному комітеті з термометрії була сформована робоча група, метою якої було оцінювання наслідків введення нового визначення Кельвіна. Робоча група узагальнила результати всіх досліджень, що відносяться до можливого нового визначення кельвіна, і рекомендувала перевизначення цієї одиниці через фіксоване значення сталої Больцмана. Вибір сталої Больцмана є абсолютно природним, оскільки у фундаментальних законах фізики завжди фігурує теплова енергія $\theta = kT$. Таким чином, стала Больцмана k є коефіцієнтом пропорційності між справжньою (істинною) характеристикою теплового стану системи – тепловою енергією і одиницею вимірювання її термодинамічної температури T , що історично склалася, – кельвіна. Першим цей зв'язок встановив Гіббс, а чисельне значення

k визначив Планк. Величина k якраз і характеризує одиницю термодинамічної температури в енергетичному еквіваленті [9].

Цей висновок добре узгоджується зі статистичним визначенням температури. Розвиток кінетичної теорії газів привів до молекулярної інтерпретації термодинамічної температури, згідно з якою температура є параметром, що характеризує енергетичне розподілення молекул системи. Ця інтерпретація була удосконалена завдяки розвиненій Гіббсом (1902 р.) статистичній механіці. Тим самим був установлений зв'язок між статистичною і термодинамічною температурами.

9.4.2. Підвищення точності вимірювання сталої Больцмана – необхідна умова перевизначення кельвіна

Як йшлося вище, сьогодні невизначеність реалізації потрібної точки води складає приблизно 50 мК, або у відносних значеннях, близько $2 \cdot 10^{-7}$. Вочевидь, що і невизначеність, з якою відома стала Больцмана, повинна бути близькою до цього значення, щоб перевизначення кельвіна не призвело до суттєвої втрати точності температурних вимірювань. За рішенням МКМВ значення стандартної невизначеності сталої Больцмана для перевизначення Кельвіна не має перевищувати $1 \cdot 10^{-6}$. Методи, які можуть бути використані для вимірювання сталої Больцмана, це ті ж методи первинної термометрії, де T пов'язана з іншими величинами, які можна виміряти, а також з відомими сталими. При цьому використовуються фундаментальні фізичні закони і закони термодинаміки.

Згідно з термодинамічним визначенням температури, для її вимірювання необхідно використовувати цикл Карно, що полягає у вимірюванні кількості теплоти. Однак на цьому шляху неможливо досягти задовільної точності. Більш точним є визначення 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:

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

де $B(T)$, $C(T)$ – віріальні коефіцієнти, що є функціями від температури. Розглянемо газотермометричні вимірювання докладніше [51].

9.4.3. Газотермометричні вимірювання

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

Газові термометри поділяються на такі основні види (рис. 9.3):

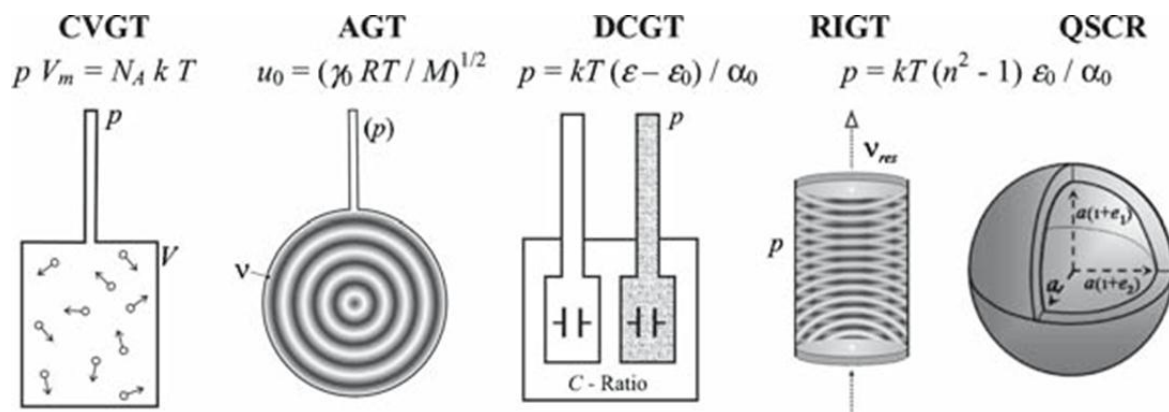


Рисунок 9.3 – Види газових термометрів

- газовий термометр сталого об'єму (CVGT);
- акустичний газовий термометр (AGT);
- газовий термометр діелектричної (сталогої) проникності (DCGT);
- газовий термометр за показником заломлення (RIGT);
- термометр на основі квазісферичного резонатора (QSCR).

До первинних методів термометрії відносять також:

- шумову термометрію;
- термометрію за доплерівським розширенням спектральної лінії;
- спектральну радіаційну термометрію.

Наведемо методи, які вважаються найбільш перспективними для вимірювання сталої Больцмана, і досягнуті за їх допомогою мінімальні невизначеності цих вимірювань на 2015 р. (табл. 9.2) [51].

Таблиця 9.2 – Методи вимірювання сталої Больцмана

Вихідний метод (засіб)	Рівняння вимірювань	Відносна стандартна невизначеність
Акустичний газовий термометр	$V_0 = \sqrt{\frac{y_0 RT}{M}}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$
Термометр за діелектричною проникністю	$P = kT \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\alpha_0}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Газовий термометр за показником заломлення	$P = kT \frac{(n^2 - 1)\varepsilon_0}{\alpha_0}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Шумовий термометр	$U_{\text{ск}}^2 = 4kTR\Delta\nu$	$5 \cdot 10^{-6}$
Доплерівський термометр	$\Delta\nu_D = \sqrt{\frac{2kT}{mc_0^2}} \nu_0$	$10 \cdot 10^{-6}$

В формулах використано такі позначення:

V_0 – швидкість звуку;

$y_0 = \frac{C_p}{C_v}$ – відношення питомих теплоємностей;

M – молярна маса газу;

ε – діелектрична стала;

ε_0 – електрична стала;

α_0 – коефіцієнт електричної поляризації;

n – показник заломлення;

$U_{\text{ск}}^2$ – середньоквадратичне значення напруги шуму;

R – електричний опір;

$\Delta\nu_D$ – доплеровське розширення спектральної лінії з частотою ν_0 ;

m – атомна маса;

c_0 – швидкість світла у вакуумі.

Акустичний газовий термометр.

У газі ряд величин залежить від температури, зокрема швидкість звуку. При вимірюванні k у NIST швидкість звуку V_0 в інертному газі аргоні визначалась за допомогою сферичного резонатора при температурі потрійної точки води, а k розраховувалась за формулою з табл. 9.1. 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 сталою.

Визначення температури через діелектричну сталу гелію давно використовується в низькотемпературній термометрії.

Для ідеального газу діелектрична стала має вигляд $\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha_0 \cdot N/V$, де N/V – щільність кількості (густина) частинок. Якщо поєднати цей вираз з рівнянням стану, одержимо зв'язок поміж P і ε , наведений в табл. 9.1. Прогрес, досягнутий в поляризації гелію в останні роки, забезпечив конкурентоспроможність цього методу. Для вимірювання ε вимірювальний газ подається у відповідні конденсатори. Через низьку поляризацію гелію абсолютні вимірювання неможливі. Тому вимірювальний конденсатор по черговому 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 у діапазоні низьких температур від 2,5 до 36 К, а також у потрібній точці води.

9.4.4. Шумова термометрія

Температура об'єкта може бути визначена шляхом спостереження статистичних або квантових явищ. Вимірювання теплових шумів використовуються в термометрії протягом багатьох років. Температура при цьому визначається через середньоквадратичне значення напруги шумів на електричному опорі за формулою Найквіста (див. табл. 9.2).

До цього часу шумова термометрія активно використовувалась при дуже низьких і дуже високих температурах. Поблизу потрібної точки води необхідно використовувати 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.

9.4.5. Термометрія за доплерівським розширенням лінії

Цей метод дозволяє вимірювати k за допомогою лазерної спектроскопії. Він ґрунтується на вимірюванні доплерівського розширення смуги поглинання частинок газу, що рухаються в ампулі з однорідною температурою. Інформацію про температуру містить ширина смуги поглинання, яка сканується за допомогою лазера (рис. 9.4).

У Парижі були проведені експерименти з CO_2 -лазером на лінії аміаку при частоті 30 ТГц, одержана при цьому невизначеність вимірювання k 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 з інших причин, зокрема через взаємодію частинок, не обіцяють зниження невизначеності менше за $1 \cdot 10^{-5}$.

9.5.6. Останні результати з уточнення сталої Больцмана

Роботи з уточнення k особливо активізувались з 2005 р., коли було прийнято рішення про підготовку до нових визначень ампера, кілограма, кельвіна і моля. Найбільш активно ці роботи проводились у *NIST* (США), *PTB* (Німеччина), *NPL* (Велика Британія), *LNE-CNAM* (Франція).

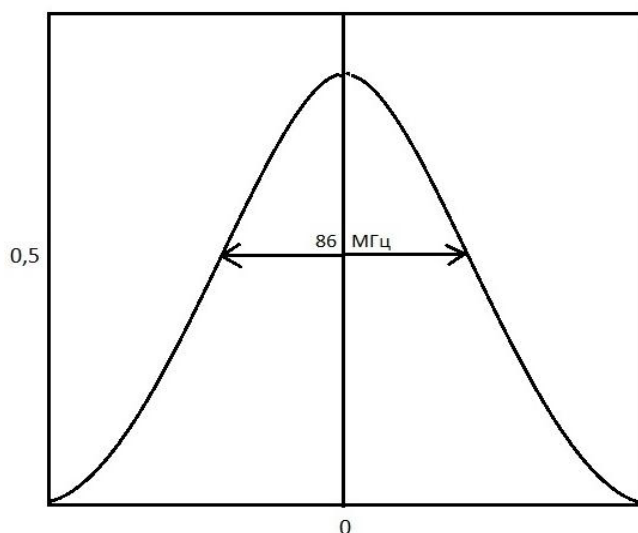


Рисунок 9.4 – Смуга поглинання

До 2010 р. найбільш точним значенням сталої Больцмана вважалось значення, одержане в *NIST* з невизначеністю $1,7 \cdot 10^{-6}$ ще в 1988 р. на акустичному газовому термометрі зі сферичним резонатором. Роботи з удосконалення апаратури і процедури вимірювання продовжувались, і у 2011 р. з'вилось повідомлення, що у *LNE-CNAM* було одержане значення сталої Больцмана з стан-

дартною невизначеністю $1,2 \cdot 10^{-6}$. У тому ж 2011 р. *NIST* опублікував нове значення $k = 1,3806488(13) \cdot 10^{-23}$ Дж/К, стандартна невизначеність якого склала $9,1 \cdot 10^{-7}$. Все це свідчить про прогрес у визначенні сталої Больцмана і виконання умови щодо досягнення рівня невизначеності цієї сталої $1 \cdot 10^{-6}$ [51].

9.6. 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.

Довготерміновим наслідком зміни є те, що первинні методи будуть розвиватися, досягати вищих точностей, більше використовуватись і поступово замінити МТШ-90 як основу температурних вимірювань. З введенням нового формулювання кельвіна необхідно буде вказувати, до якої температури належить те чи інше значення невизначеності – до T чи T_{90} . (табл. 9.3).

У передбачуваному майбутньому більшість температурних вимірювань у діапазоні від -200 до 960 °С будуть проводитися за допомогою еталонних платинових термометрів, каліброваних відповідно до МТШ-90. Оскільки МТШ-90 буде залишатися незмінною, невизначеності в T_{90} не будуть змінюватись у реалізаціях реперних точок (колонка 3 табл. 9.3).

Потрійна точка води буде продовжувати відігравати важливу роль в практичній термометрії. В дійсності, різниця в $T_{\text{пТВ}}$, яка реалізується різними еталонними ампулами потрійної точки води, може бути 50 мкК і навіть менше. Це відповідає відносній невизначеності температури $2 \cdot 10^{-7}$.

Тому довготермінові експерименти, які потребують граничної точності при або біля $T_{\text{пТВ}}$, будуть спиратися на відтворюваність потрійної точки води [44].

Таблиця 9.3 – Невизначеності реперних точок МТШ-90 до і після перевизначення

Реперні точки	T_{90} , К	$u(T_{90})$, мК	$u(T)$, мК	$u(T_k)$, мК
Cu	1357,77	15	60	60,0
Au	1337,33	10	50	50,0
Ag	1234,93	1	40	40,1
AL	933,473	0,3	25	25,0
Zn	692,677	0,1	13	13,0
Sn	505,078	0,1	5	5,03
In	429,7485	0,1	3	3,01
Ga	302,9146	0,05	1	1,05
H ₂ O	273,16	0,02	0	0,27
Hg	234,3156	0,05	1,5	1,52
Ar	83,8058	0,1	1,5	1,50
O ₂	54,3584	0,1	1	1,00
N _e	24,5561	0,2	0,5	0,50
e-H ₂	≈ 20,3	0,2	0,5	0,50
e-H ₂	≈ 17,0	0,2	0,5	0,50
e-H ₂	13,8033	0,1	0,5	0,50
⁴ He	4,2221	0,1	0,3	0,30

Висновки

- Оскільки відтворення температури в існуючих еталонах системи СІ забезпечується не прямими вимірюваннями за допомогою «первинних термометрів» (які вимірюють термодинамічну температуру), а за «основними реперними точками», *величина, яка вимірюється цими еталонами, є не термодинамічна температура, а температура у кельвінах T_{90} або градусах Цельсія t_{90} , визначених за МТШ-90.*

- Вимірювання температури, що ґрунтуються на міжнародних температурних шкалах, МТШ-90 зокрема, в порівнянні з прямими вимірюваннями термодинамічної температури, здійснюються легше і добре відтворюються. Проте МТШ-90 властиві і деякі недоліки:

- одиниця температури T , кельвін, визначена через температуру потрійної точки води, тобто пов'язана з властивостями матерії. Хоча потрійна точка води і є природним інваріантом, проте її термодинамічна температура до певної міри залежить від вмісту домішок і ізотопного складу даного об'єму води;

➤ МТШ-90 властиві недоліки, відомі в температурній метрології як «відсутність єдиності» і «неузгодженість діапазонів».

- МКМВ протягом багатьох років мав довгострокову мету визначення всіх основних одиниць SI через ФФС, щоб виключити залежність від властивостей будь-яких артефактів або матеріалів і забезпечити довгочасову стабільність одиниць.

- Робоча група з термометрії МКМВ рекомендувала перевизначення цієї одиниці через фіксоване значення сталої Больцмана. Вибір сталої Больцмана є абсолютно природним, оскільки у фундаментальних законах фізики завжди фігурує теплова енергія $\theta = kT$. Таким чином, стала Больцмана k є коефіцієнтом пропорційності між справжньою (істинною) характеристикою теплового стану системи – тепловою енергією і одиницею вимірювання її термодинамічної температури T , що історично склалася, – кельвіна.

- Невизначеність реалізації потрібної точки води складає приблизно $2 \cdot 10^{-7}$. Вочевидь, що і невизначеність, з якою відома стала Больцмана, повинна бути близькою до цього значення, за рішенням МКМВ – не більше $1 \cdot 10^{-6}$. На сьогодні досягнута невизначеність склала $0,9 \cdot 10^{-7}$, тобто умови МКМВ виконано.

- Очікується, що зміна визначення кельвіна не приведе до суттєвої зміни статусу МТШ-90. Однак МТШ-90 перестане згодом бути єдиною основою для вимірювання температури, але буде використовуватись як високоточна і надійно відтворювана шкала, яка добре пов'язана з термодинамічною шкалою.

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

Контрольні питання

1. Яка різниця між термодинамічною і практичною температурою?
2. Яка температура відтворюється за шкалою МТШ-90?
3. Що означає, що температура є неадитивною і активною величиною?
4. Як сьогодні визначається одиниця температури – кельвін?
5. Чи можна використовувати як одиницю температури градус Цельсія?
6. Чи однакові за розміром кельвін і градус Цельсія?

7. Які недоліки має існуюче визначення одиниці температури?
8. Яку основну мету має перевизначення кельвіна?
9. Як пропонується перевизначити кельвін?
10. Яку умову необхідно виконати для перевизначення кельвіна і чому?
11. Які методи можуть бути використані для вимірювання сталої Больцмана?
12. Які наслідки очікуються від перевизначення кельвіна?
13. Чи зміниться розмір кельвіна після перевизначення?
14. Які методи первинної термометрії ви знаєте?

Розділ 10

СВІТЛОВІ ВИМІРЮВАННЯ: ВІД СВІЧКИ ДО КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Важливість світлових вимірювань визначаються тією роллю, яку відіграє зір у життєвій діяльності людини: близько 80 % інформації про довколишній світ припадає на долю одного почуття – зору. У загальному бюджеті енергетичних витрат, за аналізом Міжнародного Агентства з енергетики, витрати на освітлення складають 19 %. Ступінь розвинутості держави у значній мірі може характеризуватися її «світлозабезпеченістю» при мінімізації енергоспоживання. Тому є актуальним створення освітлювальних технологій, які забезпечують не тільки високу якість освітлення, але й збереження енергії.

Проте не тільки освітленням обмежуються світлові вимірювання. В останній час інтенсивно розвиваються світлові технології в медицині, біології, мікроелектроніці, сільському господарстві. Револьюційні досягнення в мікроелектроніці дали поштовх новим джерелам світла – світлодіодам, які напевно можна назвати джерелами світла XXI сторіччя. Сонячні батареї, фотометричні перетворювачі сонячної енергії мають застосування не тільки в космічній галузі, а й у побуті. У зв'язку з цим у багатьох країнах, починаючи з середини 90-х років XX сторіччя, формуються і реалізуються спеціальні програми енергозбереження і екології в галузі освітлення, які не можуть бути реалізовані без *метрологічного забезпечення*, що б відповідало викликам часу.

10.1. Із історії світлових (фотометричних) еталонів

Історія еталонів для світлових вимірювань починається з XIX 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. Так, в Англії як світловий еталон використовувалася лампа Вернон – Гаркура, пальним якої був пентан (C_5H_{12}). Сила світла лампи Вернон – Гаркура дорівнювала близько 10 англійських свічок. У Німеччині за основну світлову одиницю приймалася сила світла лампи Гефнер – Альтенека, в якій використовувався оутово-аміловий ефір. Одиниця сили світла ці-

єї лампи одержала назву свічки Гефнера. У Франції одиниця сили світла відтворювалась за допомогою лампи Карселя, в якій пальним було свиріп'яне масло.

Сила світла всіх «полум'яних» еталонів у значній мірі залежала від чистоти пального, точності підтримання режиму горіння, атмосферного тиску, вологості повітря, процентного складу вуглекислоти в ньому і ряду інших факторів. Урахування всіх цих умов дуже ускладнювало оцінення точності відтворення прийнятих світлових величин.

Більш перспективними (внаслідок відсутності більшої частини зазначених вище джерел похибки) виявились еталони, випромінюючим елементом яких було розжарене до високої температури тверде тіло. Подібний еталон був запропонований у Франції в 1881 р. Віюлем. В еталоні Віюля за одиницю сили світла приймалася сила світла, яку випромінює розплавлена платина площею в один квадратний сантиметр при температурі її тверднення. Еталон Віюля був прийнятий у Франції постановою Міжнародного конгресу електриків у 1889 р. Як практична одиниця була прийнята одна двадцята сили світла еталона Віюля – децимальна свічка. Проте, усі зазначені вище еталони за абсолютним розміром одиниці сили світла відрізнялися один від одного.

У 1909 р. Національне бюро стандартів (NBS) США запропонувало ввести єдину одиницю сили світла в Америці, Англії і Франції та прийняти за одиницю сили світла 1 децимальну свічку, назвавши її міжнародною свічкою.

Постановою Конгресу міжнародної комісії з освітленості в 1921 р. було прийнято вважати одиницею сили світла міжнародну свічку, а її відтворення (за допомогою групи електричних ламп розжарення) і зберігання було доручено національним фотометричним лабораторіям Англії, Франції і США.

Цей найбільш досконалий на той час світловий еталон не був ідеальним, оскільки електричні лампи розжарення не могли бути стабільними за своїми світловими і електричними характеристиками, і різниця у значеннях світлової одиниці, залежно від ряду умов, могла бути досить значною. Тому ще у 1924 р. Міжнародна комісія з освітленості винесла рішення про прийняття *«чорного тіла»* як *основного світлового еталона* (еталона яскравості) і вказала на необхідність розробки методики відтворення його яскравості. Обґрунтуванням для вибору *«чорного тіла»* був ряд його позитивних властивостей як *еталонного випромінювача*. Випромінювання чорного тіла залежить тільки від температури його нагріву і діаметра випромінюючого

отвору і не залежить від матеріалу, із якого його виготовлено. При певній температурі воно має постійну і відому спектральну характеристику розподілу енергії відповідно до закону Планка.

У 1930 р. Консультативний комітет з електрики і фотометрії при СІРМ одержав пропозицію від директора NBS (США) створити первинний світловий еталон на основі чорного тіла відповідно до наведеної нижче специфікації. Чорне тіло виготовляється у вигляді трубки з внутрішнім діаметром 2,2 мм і довжиною 22 мм із плавленого окислу торію. Ця трубка поміщається у тиглі із плавленого окислу торію з розплавленою платиною (180 г). Трубка підтримується спеціальною кришкою-діафрагмою з отвором діаметром 1,5 мм. Тигель поміщається у кварцовий стакан і оточується як тепловою ізоляцією порошкоподібним плавленим окислом торію. Кварцовий стакан розігрівається за допомогою височастотної індукційної пічки. Яскравість, яка спостерігається через отвір діафрагми у момент тверднення розплавленої платини, повинна бути еталоном яскравості. За одиницю яскравості приймається стильб, який є яскравістю плоскої поверхні, що рівномірно світиться, у перпендикулярному до поверхні напрямку, і випромінює у тому ж напрямку з 1 см^2 поверхні силу світла в одну міжнародну свічку. Спрощена конструкція чорного тіла наведена на рис. 10.1.

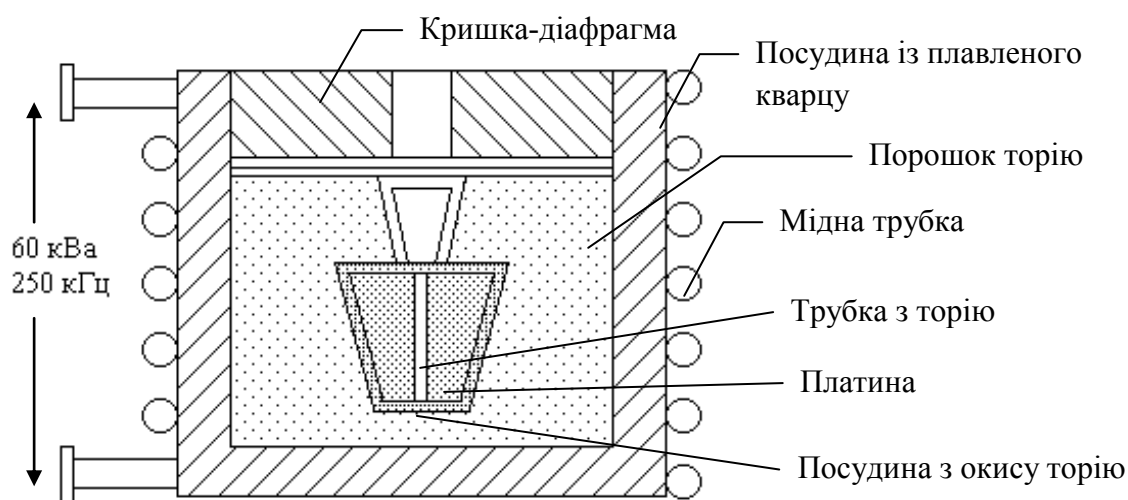


Рисунок 10.1 – Світловий еталон на основі чорного тіла

Консультативний комітет з електрики і фотометрії у 1930 р. визнав виготовлення чорного тіла за такою специфікацією прийнятним і запропонував фотометричним лабораторіям інших країн, які працюють у цьому напрямку, повторити вимірювання за методикою, запропонованою NBS. Ре-

зультати цих вимірювань, проведені у США, Національній фізичній лабораторії (Англія) і професором Рібо (Франція), дали близькі значення.

Після успішної реалізації одиниці сили світла свічки в 1931 р. цей метод став загальновизнаним. У 1948 р. на Генеральній конференції з мір та ваг було прийнято нову назву для одиниці сили світла – **кандела**. В 1967 р. Генеральна конференція прийняла більш точне визначення кандели:

«Кандела є сила світла в перпендикулярному напрямку до поверхні в $1/600\,000$ квадратного метра чорного тіла (повного випромінювача) при температурі тверднення платини при тиску в 101325 ньютонів на квадратний метр».

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

Для розуміння суті цієї проблеми уточнимо поняття радіометрії і фотометрії.

Радіометрія описує оптичне випромінювання в чисто енергетичних величинах (енергія, потужність, сила випромінювання тощо), а *фотометрія* – у величинах, пов'язаних із зоровою системою людини і її спектральною чутливістю (світловий потік, сила світла, освітленість тощо).

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

$$k_V(\lambda) = \frac{\Phi_V(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} = k_m V(\lambda), \quad (10.1)$$

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.

Характеристика спектральної чутливості людського ока, тобто залежність спектральної чутливості ока від довжини хвилі світлового випромінювання $v(\lambda)$ наведена на рис.1.3.

Оскільки еталон кандели базувався на чорному тілі при температурі тверднення платини T_{pt} , невизначеність термодинамічної температури T_{pt} 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.

Відповідно до цього визначення кандели в системі SI, коефіцієнт k_m у рівнянні (10.1) обчислюється як $683 \cdot V(555,000) / V(555,016 \text{ нм}) = 683,002 \text{ лм/Вт}$. Значення k_m , як правило, округляється до 683 лм/Вт без втрати точності реальних вимірювань.

У результаті було встановлено найбільш достовірне значення $k_m = 683 \text{ лм / Вт}$ на довжині хвилі $\lambda_m = 555 \text{ нм}$, що відповідає максимальній чутливості ока. Це дозволило сформулювати нове визначення кандели:

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

Частота $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ відповідає довжині хвилі 555,016 нм для стандартної атмосфери.

Це визначення після тривалого обговорення було прийнято на XVI Генеральній конференції з мір та ваг у 1979 р. і є чинним і дотепер.

Порівняння енергетичних і фотометричних величин наведено у табл. 10.1.

Таблиця 10.1 – 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)
Потік випромінювання	Φ_e	Вт	Світловий потік	Φ_v	кд·ср = люмен (лм)
Енергія випромінювання	Q_e	Вт·с	Світлова енергія	Q_v	лм·с
Енергетична яскравість	L_e	Вт·ср ⁻¹ ·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 = люкс (лк)
Енергетична експозиція	H_e	Вт·м ⁻² ·с	Світлова експозиція	H_v	лм·м ⁻² ·с = лк·с

З нового визначення кандели витікають такі основні положення.

1. Спосіб відтворення одиниці сили світла не визначений. При цьому в коментарях до рішення ГКМВ відзначено, що з ухваленням нового визначення кожна національна лабораторія буде повністю вільна у виборі методу відтворення.

2. Установлено фіксоване значення максимальної світлової активності ($k_m = 683$ лм/вт). Цей коефіцієнт нормує функцію $V(\lambda)$ – відносну світлову ефективність.

3. Точне значення k_m , використовуване разом з існуючою функцією $V(\lambda)$, дає точне значення відношення сили світла до енергетичної сили світла монохроматичного випромінювання на будь-якій довжині хвилі в межах $V(\lambda)$.

4. У рішенні ГКМВ відзначено, що нове визначення дозволяє національним лабораторіям відтворювати силу світла *без використання чорного тіла*.

Нове визначення кандели відкрило шлях до використання не тільки методу «*еталонного джерела*» (чорного тіла), а й методу «*еталонного приймача*».

10.2. Еталони одиниці сили світла на основі приймача

10.2.1. Еталон кандели на основі приймача-радіометра

Використовуючи нове визначення кандели, у Великій Британії удалося створити еталон на основі приймача, який забезпечував похибку відтворення кандели на рівні 0,1 %. Як приймач використовувався прецизійний *радіометр (вимірювач потужності оптичного випромінювання) з електричним заміщенням*. З існуючих радіометрів такого типу найбільш високу точність мають *кріогенні радіометри*. Кріогенний радіометр є унікальним приладом, що забезпечує точні вимірювання радіаційних потужностей в широкому спектральному діапазоні, який охоплює ультрафіолетову, видиму і інфрачервону області спектра [52].

Після введення нового визначення більшість національних метрологічних інститутів (НМІ) одержала змогу реалізувати канделу на основі абсолютних кріогенних приймачів на більш високому рівні, ніж на випромінюванні чорного тіла. Багато інститутів реалізувало канделу на базі радіометра з електричним заміщенням при кімнатній температурі. Інші фотометричні одиниці, такі як люмен (одиниця світлового потоку) і люкс (одиниця освітленості), виводяться із кандели.

Поява у метрологічній практиці абсолютного кріогенного радіометра означала новий рівень точності у радіометричних та фотометричних вимірюваннях, підвищений практично на порядок порівняно з тим, що існував раніше. Абсолютні кріогенні радіометри зараз використовуються в НМІ для побудови радіометричних шкал з похибкою порядку 0,01 °С.

Кріогенний радіометр розглядається зараз як найбільш точний засіб для відтворення радіометричних шкал, він очолює ланцюг простежуваності і утворює абсолютний радіометричний базис. Кріогенні радіометри, які використовуються для реалізації кандели, дають змогу знизити розширену невизначеність до (0,2–0,4) %.

10.2.2. Приймач на основі фотодетектора

Незважаючи на позитивні якості кріогенний радіометр є дорогим і достатньо складним у виготовленні і експлуатації пристроєм. Тому в останні роки одержали розвиток альтернативні методи і засоби відтворення кандели, а прилади найвищої точності – кріогенні радіометри – в основному використовуються як унікальні пристрої, що забезпечують відразу декілька напрямків оптико-фізичних вимірювань.

Для забезпечення світлових вимірювань широке використання одержали фотоприймачі (фотометри). Ці приймачі побудовані на *фотодетекторах*, що використовують *квантове фізичне явище – фотоефект*, яке полягає в іонізації атомів і молекул газу під дією світла. В конденсованих тілах (твердих і рідких) розрізняють зовнішній і внутрішній фотоефекти. Зовнішній фотоефект – емітування електронів речовиною під дією світла. Електрони, що випромінюються при зовнішньому фотоефекті, мають назву фотоелектронів, а виникаючий струм – фотоструму.

Схему фотоприймача (фотометра) показано на рис. 10.2, його суттєвими складовими є прецизійна діафрагма, фільтр, коригований під $V(\lambda)$ функцію, і фотодетектор. Розглянемо принцип вимірювання сили світла за допомогою фотоприймача.

Спочатку визначається абсолютна спектральна чутливість $S(\lambda)$ (в амперах на ват) на основі шкали абсолютної спектральної чутливості. Далі вимірюється площа апертури A . Світлову ефективність S_λ (в амперах на люкс) фотометра можна одержати з виразу

$$S_{\lambda} = \frac{A \int S(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{k_m \int S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (10.2)$$

де $S(\lambda)$ – розподіл спектральної потужності світла, що вимірюється; $V(\lambda)$ – функція спектральної світлової ефективності; k_m – максимум спектральної світлової ефективності (683 лм / Вт).

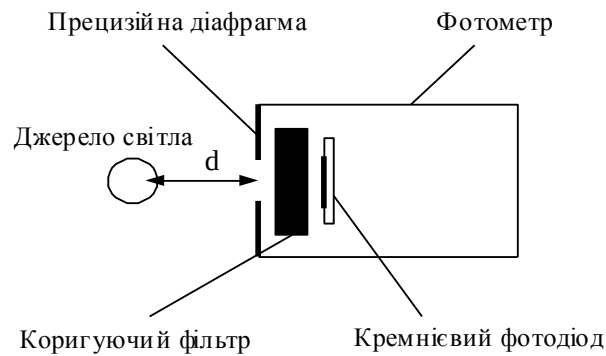


Рисунок 10.3 – Спрощена схема приймача (фотометра)

Як правило, для $S(\lambda)$ використовується планківське випромінення при температурі $T = 2858$ К, освітлювач типу А, за МКО. Калібрований фотометр відтворює одиницю освітленості.

Силу світла джерела (в канделах) знаходять за формулою [52]:

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

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

Важливою метрологічною характеристикою фотоприймача є *квантова ефективність*.

Квантова ефективність – це відношення числа фотонів, поглинання яких викликало утворення квазічастинок (електронів), до загального числа поглинутих фотонів (використовується також термін «*коефіцієнт перетворення фотодіодів*»). Вона є мірою світлової чутливості і основною характеристикою детекторів фотонів. У приймача, схема якого наведена на рис.10.3, вона досить обмежена, оскільки частина світла не поглинається, відбивається і проникає на вихід фотометра. Пошуки більш ефективних рішень привели до створення так званих *trap-детекторів* з квантовою ефективністю, близькою до 100 %.

10.2.3. Приймач на основі трап-детектора

Трап-детектор (детектор-пастка) – специфічний фотодетектор, побудований таким чином, щоб поглинути максимум енергії світла і перетворити її в електричну енергію. Для цього він складається з кількох діодів, установлених послідовно на шляху світла під різними кутами таким чином, щоб після багаторазового відбиття світло не вийшло з пастки [53].

Розвиток фотодіодних приймачів і останні їх розробки дозволяють стверджувати, що відбувся якісний скачок у 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*) і проводити вимірювання сили світла з невизначеністю в декілька одиниць на 10^{-6} . Для серійних фотоприймачів на трап-детекторах типова невизначеність вимірювань складає від $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-3}$.

Використання трап-детекторів як абсолютних приймачів, починаючи з 1995 р., стало звичайною практикою. За таким принципом побудовані первинні еталони Канади, Нової Зеландії, Німеччини, Туреччини. Враховуючи це використання коштовних та складних під час експлуатування кріогенних радіометрів стає економічно недоцільним.

Останніми роками з'явилися розробки нової конфігурації трап-детектора, що складається з двох великих фотодіодів, утворюючих клин (рис. 10.4).

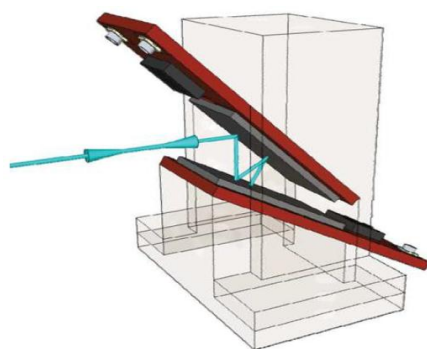


Рисунок 10.4 – Оптична схема двохдіодного трап-детектора з 7-кратним віддзеркаленням

Така конфігурація може використовуватися як при кріогенних температурах (при цьому невизначеність вимірювань потужності може бути менше $1 \cdot 10^{-6}$), так і при кімнатних температурах (рис. 10.5) з невизначеністю близько 10^{-4} .

Використання таких приладів відкриває можливості нового варіанта відтворення кандели, що базується на білому світлодіоді як джерелі світла і приймачі на базі трап-детектора.



Рисунок 10.5 – Промисловий прилад з передбаченою квантовою ефективністю

10.3. Первинний еталон України одиниці сили світла – кандели

У 1996 р. первинний еталон України було побудовано на базі абсолютного кріогенного радіометра, який успішно виконував свої функції до 2015 р. [52]. У 2015 р. виходячи з обставин, викладених вище, було вирішено створити еталон на основі трап-детектора.

В рамках роботи над удосконаленням еталона в ННЦ « Інститут метрології» був розроблений, створений і досліджений фотометр (рис. 10.6), що базується на трап-детекторі.

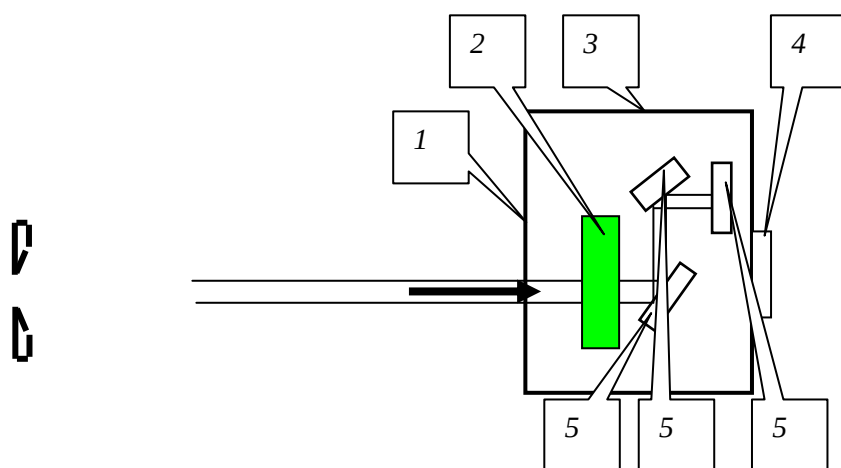


Рисунок 10.6 – Схема фотометра на базі трап-детектора:

1 – діафрагма; 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 додаткова апаратура.

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

Еталон має такі 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 похибки (випадкова S і НСП Θ) і розширена невизначеність (U) відтворення одиниць сили світла, освітленості та освітлення не перевищують:

- сили світла – кандели
 $S = 0,15 \cdot 10^{-2}$; $\Theta = 0,15 \cdot 10^{-2}$; $U = 0,3 \cdot 10^{-2}$ ($k = 2$);
- освітленості – люкса
 $S = 0,15 \cdot 10^{-2}$; $\Theta = 0,15 \cdot 10^{-2}$; $U = 0,3 \cdot 10^{-2}$ ($k = 2$);
- освітлення – кандели на секунду
 $S = 0,25 \cdot 10^{-2}$; $\Theta = 0,35 \cdot 10^{-2}$; $U = 0,6 \cdot 10^{-2}$ ($k = 2$).

Ці значення відповідають світовому рівню.

10.4. Відтворення одиниці світлового потоку – люмена.

Еталон України

Найважливішою з точки зору економіки характеристикою світлових технологій, як йшлося вище, є світлова ефективність, що визначається в люменах на квадратний метр (лм/м²).

Світловий потік, одиницею якого є *люмен*, став, таким чином, найбільш важливою фотометричною величиною. В міжнародному співтоваристві метрологів-фотометристів в останні роки раз за разом піднімається питання про перегляд основної одиниці від оптики, а саме – *люмена* замість *кандели*. Тому одним з базових еталонів у галузі фотометрії,

разом із еталоном кандели, є еталон люмена. Всі розвинені країни світу мають такі еталони і ведуть роботи з їх удосконалення.

Існує два основні методи вимірювання повного світлового потоку, тобто відтворення *люмена*, на яких і базуються еталонні вимірювання:

- 1) гоніометричний метод;
- 2) метод інтегруючої сфери.

Саме метод інтегруючої сфери, як більш перспективний, було обрано для створення первинного еталона люмена України.

Еталон складається з ряду установок:

- установки для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання малих розмірів;
- установки для відтворення та передавання одиниці світлового потоку джерелам випромінювання великих розмірів;
- системи автоматичного керування, реєстрування та оброблення інформації на основі засобів обчислювальної техніки;
- системи живлення джерел випромінювання.

На рис. 10.7 наведено зовнішній вигляд первинного еталона, а на рис. 10.8 – структурну схему апаратури еталона.

Для вимірювання потужності потоку монохроматичного випромінювання в трап-детекторі використовуються фотодіоди фірми *Hamamatsu*, які мають стовідсоткову внутрішню квантову ефективність для оптичного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 400 до 900 нм.



Рисунок 10.7 – Зовнішній вигляд еталона одиниці світлового потоку

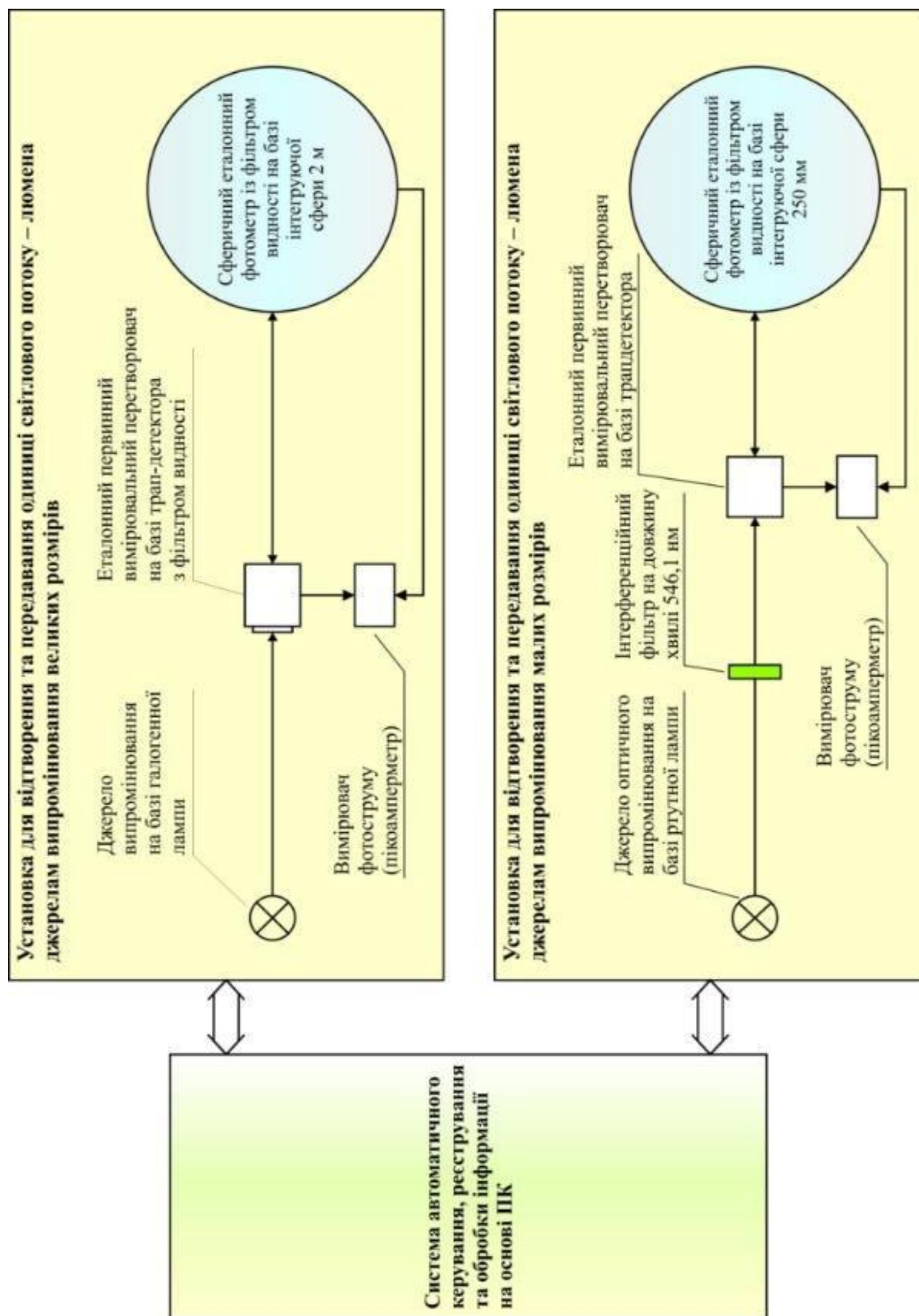


Рисунок 10.8 – Структурна схема еталона одиниці світлового потоку

Створений еталон має такі метрологічні характеристики [54]:

- діапазон значень світлового потоку 1–1500 лм;
- випадкова похибка (СКВ) – від $0,1 \cdot 10^{-2}$;
- НСП – від $0,25 \cdot 10^{-2}$;
- розширена невизначеність – від $0,3 \cdot 10^{-2}$.

Ці характеристики перебувають на рівні відповідних характеристик національних еталонів економічно розвинених країн.

10.5. Про перспективу квантового перевизначення світлових одиниць

Як відомо, саме з гіпотези Ейнштейна про дискретний (квантовий) характер світлового випромінювання почався активний розвиток квантової теорії. Очікувалось, що світлові кванти – фотони – у найближчі роки стануть природними одиницями для вимірювання світлових величин, але на практиці реалізувати це виявилось не так просто.

Говорячи про квантову перспективу світлових вимірювань і можливе перевизначення кандели, повернемося до термінів «радіометрія» і «фотометрія».

Термін «радіометрія» є найбільш універсальним, бо використовується у всьому діапазоні, пов'язаному з інтенсивністю електромагнітних полів у просторі. Базовими одиницями в радіометрії є джоуль і ват.

У діапазоні електромагнітних випромінювань, пов'язаних із світловим сприйняттям ока людини (від 380 до 780 нм), використовується термін «фотометрія», а базовими одиницями є кандела і люмен.

У діапазоні частот від нуля до приблизно 10^8 Гц працює математичний апарат електричних кіл з зосередженими параметрами. Вище цих частот починає діяти апарат рівнянь Максвелла, який використовується до частот близько 10^{15} Гц і навіть вище. Далі існує досить широка перехідна область, де класичний підхід повинен доповнюватись квантовим, і саме в цій області знаходиться видимий діапазон частот.

Для квантового підходу основною фізичною величиною, що характеризує інтенсивність випромінювання, є кількість фотонів N в одиницю часу через задану одиничну площину зі стороною l . Оскільки енергія одиничного фотона за квантовомеханічною формулою $E_i = hf_i$, вираз для переносу енергії на одиницю площі за час t має вигляд [14]

$$E_S(t) = \frac{1}{l^2} \sum_{i=1}^N h f_i t = h \bar{f} N t,$$

де $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i$ – середня частота випромінювання; $l^2 = 1$.

З цього виразу видно, що при квантовому підході необхідно вміти рахувати одиничні фотони, іншими словами, мати можливість створювати джерела випромінювань з точно відомим числом фотонів за секунду, а також приймачі, чутливість і роздільна здатність яких може бути на рівні одного фотона.

Саме через відсутність надійних методів і засобів маніпулювання окремими фотонами перевизначення фотометричних одиниць у квантових термінах поки не відбулось.

Недавні досягнення, отримані в управлінні і рахуванні окремих фотонів, а також у створенні однофотонних джерел, виглядають багатообіцяюче [55,56]. Слід очікувати найближчим часом створення джерел випромінювання з точно встановленим числом фотонів за секунду, що дозволить отримати безпрецедентну прецизійність вимірювань. Можливість надійного маніпулювання окремими фотонами сприятиме розвитку нових типів приладів, які, у свою чергу, вимагають подальшого розвитку метрології, створення нових, що базуються на квантових явищах, методів калібрування та відповідних еталонів. З цих міркувань рано чи пізніше слід очікувати перевизначення кандели в термінах фотонних одиниць.

На цей час діє міжнародний проект «Квантова кандела», який фінансується Європейською комісією і спрямований саме на перегляд основної одиниці СІ кандели з точки зору визначення її через кількість фотонів, а не оптичну потужність, пов'язавши таким чином зі сталою Планка. Відзначається також, що це «дозволить подолати розрив між макроскопічними (оптична потужність) і квантовими величинами (фотон), досягти більшої узгодженості між визначеннями основних одиниць і буде сприяти розвитку як квантових технологій, так і класичної радіометрії» [56].

Висновки

- Визначення кандели 1979 р. фактично встановлює світлову сталу – спектральну силу світлового потоку на частоті $540 \cdot 10^{12}$ Гц, яка складає 683 лм/Вт і пов'язує фотометричні і радіометричні величини.

- Нове визначення кандели (1979 р.) відкрило шлях до розробки нових методів її відтворення з використанням не тільки еталонного випромінювача (чорного тіла), але й еталонного приймача.

- Сьогодні використовуються два види еталонних приймачів: криогенний радіометр і фотоприймач.

- Найкращі метрологічні характеристики забезпечує криогенний радіометр, але використання у фотоприймачах нових видів фотодетекторів – трап-детекторів з стовідсотковою 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 у прецизійній і практичній фотометрії, створенні приладів нового покоління.

- Одним із напрямків досліджень у фундаментальній радіо- і фотометрії є пошук шляхів 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 у цілому.

Контрольні питання

1. Що розуміється під термінами *«радіометрія»* і *«фотометрія»*?
2. Назвіть приклади величин і одиниць, які використовуються в радіометрії і фотометрії.
3. Назвіть основну одиницю SI від оптики і її визначення.
4. Що означає частота $540 \cdot 10^{12}$ Гц у визначенні кандели?
5. Яку фізичну суть має число $1/683$ Вт/ср у визначенні кандели?
6. Які основні методи відтворення кандели ви знаєте?
7. У чому суть квантового підходу до визначення кандели?
8. Який квантовий ефект використовується у фотодетекторі ?
9. Що таке радіометр, криогенний радіометр?
10. Що таке трап-детектор?
11. Які основні пристрої входять до складу еталона кандели України; еталона Люмена?
12. Які орієнтовні метрологічні характеристики мають указані еталони?

Розділ 11

НОВА ВЕРСІЯ SI (NEW SI)

11.1. Перевизначення одиниць і нова SI

Безумовні переваги квантових методів відтворення одиниць, позитивний приклад визначення одиниць часу і довжини через ФСС, успіхи в реалізації квантових ефектів і відповідних технологій, результати, що подають надію у створенні природного еталона кілограма – все це створило передумови для подальшого перегляду визначень ряду одиниць у напрямку їх прив'язки до ФСС.

На 23-му засіданні ГКМВ у 2007 р. була прийнята рекомендація про перевизначення кілограма, ампера, кельвіна і моля через ФСС, а також був сформований перелік робіт для прийняття нових визначень у найближчий час. Розглянемо варіанти і принципи формування нових визначень (табл. 11.1), що потребують фіксації чотирьох ФФС: сталої Планка h , елементарного електричного заряду e , сталої Больцмана k , сталої Авогадро N_A (як доповнення до зафіксованого раніше значення швидкості світла c). При цьому мають виконуватись такі рекомендації МКМВ [44]:

1) загальна структура SI, тобто основні величини SI та їх одиниці, мають залишитися незмінними, оскільки вони відповідають необхідним вимогам;

2) необов'язково, щоб нове визначення одиниці дозволяло зменшити похибку (невизначеність) при її відтворенні. Для метрології і науки в цілому переваги від заміни сучасних визначень визначеннями через сталі значно перевищують незначне збільшення невизначеності, яке може виникнути при реалізації цих одиниць;

3) одиниці, які слід перевизначити, і сталі, з якими вони мають бути пов'язані, треба вибрати таким чином, щоб з'явилися переваги як для метрології, так і для науки в цілому;

4) нове визначення одиниці не повинне призводити до розриву в її значеннях. Тобто іншими словами, обрані значення сталої Планка h , елементарного електричного заряду e , сталої Больцмана k і сталої Авогадро N_A мають бути настільки близькими до їх значень у SI, наскільки це дозволяють сучасні знання.

Таблиця 11.1 – Варіанти визначень кілограма, ампера, кельвіна, моля

	Кілограм	Ампер	Кельвін	Моль
Явне визначення	(кг-1a) Кілограм є масою тіла, еквівалентна енергія якого дорівнює енергії такого числа фотонів, сума частот яких дорівнює точно $\frac{299792458^2}{66260693} \cdot 10^{41}$ Гц	(А-1) Ампер є сила електричного струму у напрямку потоку, який містить $\frac{1}{1,60217653 \cdot 10^{-19}}$ елементарних зарядів у секунду	(К-1) Кельвін є таке змінення термодинамічної температури, яке призводить до змінення теплової енергії kT точно на $1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж	(моль-1) Моль є кількість речовини системи, яка містить точно $6,0221415 \cdot 10^{23}$ елементарних об'єктів, якими можуть бути атоми, молекули, іони, електрони, інші частинки або точно визначені групи частинок
	(кг-1b) Кілограм є масою тіла, для якого частота де Бройля –Комптона дорівнює точно $\frac{299792458}{66260693} \cdot 10^{-34}$ Гц			
Визначення через сталі	(кг-2) Кілограм є одиниця маси така, що стала Планка дорівнює точно $66260693 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	(А-2) Ампер є одиниця сили електричного струму така, що елементарний заряд дорівнює точно $1,60217653 \cdot 10^{-19}$ Кл	(К-2) Кельвін є одиниця термодинамічної температури така, що стала Больцмана дорівнює точно $1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж/К	(моль-2) Моль є одиниця кількості речовини, що складається із визначених структурних елементів (атомів, молекул, іонів, електронів, інших частинок або груп частинок) така, що стала Авогадро дорівнює точно $6,0221415 \cdot 10^{23}$ на моль

Як ми бачимо з табл. 11.1, для кожної з одиниць даються 2 варіанти визначень, які автори називають: перше – явним, друге – через сталі (для кілограма даються два варіанти явного визначення). Розглянемо їх коротко.

11.1.1. Явні визначення одиниць

Кілограм. Пропонується два формулювання явного визначення кілограма, але вони приводять до однакових результатів. У першому з них (кг-1a) еквівалентна енергія тіла масою 1 кг прирівнюється до енергії деякого числа фотонів. В другому (кг-1b) значення «комптонівської частоти» (частоти де Бройля – Комптона) присвоюється тілу масою в 1 кг.

Обидва визначення базуються на фіксації сталої Планка.

Ампер (А-1). Амперу дається досить пряме визначення, яке зв'язує ампер з точним значенням e .

Кельвін (К-1). У цьому визначенні слід звернути увагу на слова «точно на $1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж». Автори ввели слово «точно» для узгодження з іншим визначенням. Оскільки в цьому визначенні сказано, що $k(1K) = 1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж, з цього виразу ми одержуємо значення сталої Больцмана $k = 1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹.

Моль (моль-1). У визначенні моля має бути точно вказано вид структурних елементів. Це можуть бути атоми, молекули, іони, електрони, інші частинки або точно визначені групи частинок. Все це сформульовано в даному визначенні.

11.1.2. Визначення через сталі

Визначення через сталі просто констатують, що одиниця обумовлюється завданням точного значення якоїсь фундаментальної сталої. Запропоновані визначення мають загальну конструкцію: [найменування одиниці] є така одиниця [найменування величини], що [найменування фундаментальної сталої] дорівнює точно [значенню сталої].

Перевагою такого визначення є простота, коротке формулювання, явне позначення тієї ФФС, до якої прив'язана одиниця, і фіксація точного значення цієї сталої. Якщо МККВ будуть прийняті такі визначення, то цей підхід логічно застосувати для всіх семи основних одиниць. Очевидно, що такі визначення суттєво відрізняються від сучасного способу явного визначення основних одиниць, що може стати предметом дискусії.

11.2. Стан на сьогодні (2017 р.)

24-те і 25-те засідання ГКМВ (2011 і 2014 рр.) констатували, що робота іде успішно, хоча не всі необхідні вимоги виконані, тому «неможливо прийняти кінцеве рішення, але можна вже зараз подати чітке викладення того, що необхідно зробити» [57].

ГКМВ підтвердила незмінність своєї позиції щодо необхідності перевизначення кілограма, ампера, кельвіна і моля. При перевизначеності кілограма ГКМВ віддала перевагу його прив'язці до сталої Планка, а при виборі нових визначень – визначенням через сталі.

Цитуємо витяг з резолюції ГКМВ [57]:

Міжнародна система одиниць New SI буде системою одиниць, в якій:

- частота надтонкого розщеплювання атома цезію-133 в основному стані ν_{Cs} складає точно $9\,192\,631\,770$ Гц;
- швидкість світла у вакуумі c_0 складає точно $299\,792\,458$ м с⁻¹;
- стала Планка h складає точно $6,626\,06X \times 10^{-34}$ Дж с;
- елементарний заряд e складає точно $1,602\,17X \times 10^{-19}$ с А або Кл;
- стала Больцмана k складає точно $1,380\,6X \times 10^{-23}$ Дж К⁻¹;
- стала Авогадро N_A складає точно $6,022\,14X \times 10^{23}$ моль⁻¹;
- світлова ефективність K_{cd} монохроматичного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц складає точно 683 лм/Вт, де символ X є однією або декількома цифрами, які потрібно додати до числових значень h , e , k і N_A , з використанням найостаннішого коректування Комітета з числових даних для науки і техніки (CODATA).

Звідси витікає, що SI буде й надалі мати поточний набір семи базових одиниць, зокрема:

- кілограм залишиться одиницею маси, але його розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Планка;
- ампер залишиться одиницею електричного струму, але його розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення елементарного заряду;
- кельвін залишиться одиницею термодинамічної температури, але його розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Больцмана;
- моль залишиться одиницею кількості речовини, яка містить певну кількість елементарних частинок або певних груп частинок, але його розмір установлюватиметься за допомогою фіксації числового значення сталої Авогадро.
- Міжнародний комітет з мір і ваг також пропонує переформулювати існуючі визначення секунди, метра й кандели у повністю еквівалентних формах:

➤ секунда є одиницею часу, її розмір установлюється за допомогою фіксації числового значення частоти надтонкого розщеплювання атома цезію-133 в основному стані та за температури 0 К;

➤ метр є одиницею довжини; її розмір установлюється за допомогою фіксації числового значення швидкості світла у вакуумі;

➤ *канделає одиницею сили світла в певному напрямі; її розмір установлюється за допомогою фіксації числового значення світлової ефективності монохромного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц.*

У резолюції ГКМВ не названо точну дату (орієнтовна – 2018 р.) введення нових визначень, оскільки це буде залежати від стану справ з забезпеченням необхідних для цього умов.

Зазначається також, що разом з введенням нових визначень будуть скасовані діючі сьогодні визначення кілограма, ампера, моля, кельвіна, метра, секунди і кандели. Далі в резолюції підкреслюється, що у той самий термін маса міжнародного прототипу кілограма, магнітна стала μ_0 , термодинамічна температура потрійної точки води $T_{\text{ТТВ}}$ перестають бути точно відомими сталими, але зберігають свої значення з деякими невизначеностями, які будуть додатково встановлені безпосередньо перед введенням перевизначень.

Резолюція містить також звернення до усіх організацій і наукових закладів з метрології продовжити і посилити роботу з прискорення впровадження перевизначень і створення нової системи одиниць, названої New SI [57].

11.3. Аналіз запропонованих визначень основних одиниць

Запропоновані визначення значною мірою відходять від сучасного способу явних визначень основних одиниць SI. Тому покажемо, що прийнятті значення ν_{cs} , h , e , k , N_A , $K(\lambda_{555})$ означають відповідно секунду, метр, кілограм, ампер, кельвін, моль і канделу, а також указують на методи реалізації цих одиниць у лабораторії.

11.3.1. Секунда, метр, кандела

Розгляд почнемо з одиниць, що вже визначені через сталі, але в новій SI одержують нові формулювання.

Секунда

За визначенням, що пропонується, $\nu = 9192631770$ Гц; оскільки $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$, одержуємо $1 \text{ с} = 9192631770 / \nu$, тобто визначення секунди в New SI є однозначним і адекватним діючому.

Крім того, це визначення, як і діюче, вказує на принцип відтворення секунди – через період (частоту) розщеплення атома цезію-133.

Метр

За визначенням, що пропонується, швидкість світла $c_0 = 299\,792\,458\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, тоді $1\text{ м} = (c_0 \cdot 1\text{ с}) / 299\,792\,458$, тобто визначення метра в New SI є однозначним і адекватним діючому. Воно також вказує на принцип відтворення метра: через швидкість і частоту (період) світлової хвилі (див. підрозд. 3.3, 3.4).

Кандела

Відповідно до нового визначення $K(\lambda_{555}) = 683\text{ лм/Вт}$, або $683\text{ кд ср м}^{-2}\text{кг}^{-2}\text{с}^3$. Тоді $1\text{ кд} = K(\lambda_{555})/683\text{ Вт/ср}$, що є адекватним діючому в SI визначенню.

11.3.2. Кілограм

В новій SI визначення кілограма суттєво відрізняється від діючого на цей час:

Діюче визначення SI	Визначення New SI
Одиниця маси, що дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма	Кілограм – одиниця маси, її розмір буде встановлений через фіксацію точного чисельного значення сталої Планка $6,626\,06\text{X}\times 10^{-34}\text{ Дж с}$ або $\text{м}^2\text{ кг}\cdot\text{с}^{-2}$

Згідно з новим визначенням $h = 6,626\,06\text{X}\times 10^{-34}\text{ м}^2\text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$;

$1\text{ кг} = (h/6,626\,06\text{X}\times 10^{-34})\text{ м}^{-2}\text{ с}$.

Оскільки масу можна пов'язати зі сталою h в лабораторних умовах за допомогою, наприклад, ватт-вагів, метр і секунда також можуть бути реалізовані в лабораторії, а $6,626\,06\text{X}\times 10^{-34}$ є просто числом, то дане визначення може бути використане для практичної реалізації кілограма.

11.3.3. Ампер

Відповідно визначення ампера відрізняється:

Діюче визначення SI	Визначення New SI
Ампер – сила незмінного електричного струму, який під час протікання по двох нескінченно довгих паралельних прямолінійних провідниках 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 у $2\cdot 10^{-7}\text{ Н}$	Ампер – одиниця сили електричного струму, її розмір буде встановлений через фіксацію точного чисельного значення елементарного заряду, що дорівнює точно $1,602\,17\text{X}\times 10^{-19}\text{ Кл}$, або $\text{с}\cdot\text{А}$

Згідно з новим визначенням $e = 1,602\,17\text{X}\times 10^{-19}\text{ с А}$,

тоді $1 \text{ A} = e \cdot 1\text{с}^{-1} / 1,602\,17\text{X}\times 10^{-19}$.

Як показано в підрозд. 4.5, сила струму може бути пов'язана з величиною $e \cdot 1\text{с}^{-1}$ за допомогою квантових ефектів Джозефсона і Холла або, в перспективі, за допомогою ефекту одноелектронного тунелювання.

11.3.4. Кельвін

Також є різниця у визначенні кельвіна:

Діюче визначення SI	Визначення New SI
Кельвін – одиниця термодинамічної температури, яка і дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води	Кельвін – одиниця термодинамічної температури, розмір якої буде встановлений через фіксацію чисельного значення сталої Больцмана $k = 1,380\,6\text{X}\times 10^{-23} \text{ Дж/К}$, на основі виразу одиниці SI $\text{Дж м}^2 \text{ кг с}^{-2}$

З визначення k знаходимо:

$$1 \text{ K} = 1,380\,6\text{X}\times 10^{-23} / k \text{ Дж} = 1,380\,6\text{X}\times 10^{-23} / k \text{ м}^{-2} \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}.$$

Таким чином, термодинамічна температура може бути прив'язана до k за допомогою кількох різних експериментів.

11.3.5. Моль

Моль визначається зараз також по-іншому:

Діюче визначення SI	Визначення New SI.
Моль – кількість речовини, яка містить стільки структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою $0,012 \text{ кг}$	Моль – одиниця кількості речовини визначеної елементарної структури, яка може бути атомом, молекулою, іоном, електроном і будь-якою іншою частинкою, але його розмір буде встановлений через фіксацію чисельного значення сталої Авогадро, що дорівнює точно $6,022\,14\text{X}\times 10^{23}$ моль ⁻¹

З визначення N_A знаходимо: $1 \text{ моль} = 6,022\,14\text{X}\times 10^{23} / N_A$.

Молярна маса структурного елемента може бути прив'язана до N_A через відносну масу атома.

11.4. Наслідки впровадження нової SI

Найважливішим наслідком нової системи буде, безумовно, позбавлення від останнього артефакту – прототипу кілограма – і перехід на його при-

родне визначення. Це позитивно вплине також на інші одиниці, пов'язані з кілограмом.

Очевидно позитивними є наслідки перевизначення для метрології в електриці, де фактично вже склалась система еталонів, що ґрунтується на квантових ефектах. Для розуміння наслідків розглянемо принципові особливості квантових еталонів.

Як відомо, для узгодження електричних і механічних явищ стало необхідним (незалежно від системи) приєднати до трьох основних механічних одиниць (метра, кілограма, секунди) четверту електричну чи магнітну одиницю, якою як у СГСМ, так і в SI фактично стала магнітна стала μ_0 (у системі СГСМ у неявному вигляді, шляхом прирівнювання одиниці). У SI μ_0 постульована рівною $4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м і увійшла у визначення ампера, що забезпечило ідентичність електричних і механічних одиниць енергії та потужності. Якщо ж використовувати для визначення тесли та вольт-ампера ефекти ЯМР і Джозефсона, то вимірюються: у першому випадку – магнітна індукція B і частота прецесії, у другому – напруга та частота опромінення. Це порушує зв'язок між електричними та механічними одиницями. Хоча точність відтворення одиниць при цьому істотно зростає, це вже будуть, строго кажучи, інші одиниці, а не одиниці SI.

Якщо ж у SI перейти до формулювання, наприклад, вольт-ампера через ефект Джозефсона, тесли через ефект ЯМР і ампера через квантові ефекти, то μ_0 більше не буде мати точно постульованого значення $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а буде величиною, що визначається експериментально, тобто порушиться сучасна система одиниць, установлена в міжнародному масштабі зусиллями багатьох вчених.

Сьогодні безсумнівні переваги квантових еталонів поєднуються із принциповими позитивними рисами міжнародної системи SI шляхом компромісу. Насамперед, залишено незмінним теоретичне визначення ампера в SI через механічні явища, що зберігає значення $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (а також і значення ϵ_0 , і співвідношення $\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 = 1$). У той же час рекомендовано (на рівні МКМВ) відтворення вольт-ампера здійснювати в національних еталонах на основі квантових ефектів із застосуванням єдиних для всіх країн значень ФФС, що установлюються КОДАТА.

Таким чином, виник дуалізм у визначеннях електричних одиниць, про що вже було сказано у розділі 7. Суттєво, що цей дуалізм не обмежується

вольт, ом і теслою, а розповсюджується на інші електричні одиниці, оскільки всі вони спираються на квантові еталони.

Очевидно, що природним і логічним шляхом усунення цього дуалізму є запропоноване перевизначення основних одиниць. Дійсно, в новій версії SI слідом за сталими Планка h і елементарним зарядом e точні значення одержують сталі Джозефсона $K_{Дж} = \frac{2e}{h}$ і Клітцинга $R_K = \frac{h}{e^2}$. Це означає, що одиниці, які ґрунтуються на квантових ефектах і ФФС, становляться одиницями SI, тобто дуалізм повністю усувається.

Зв'язок основних одиниць з ФФС показано на рис. 11.1.

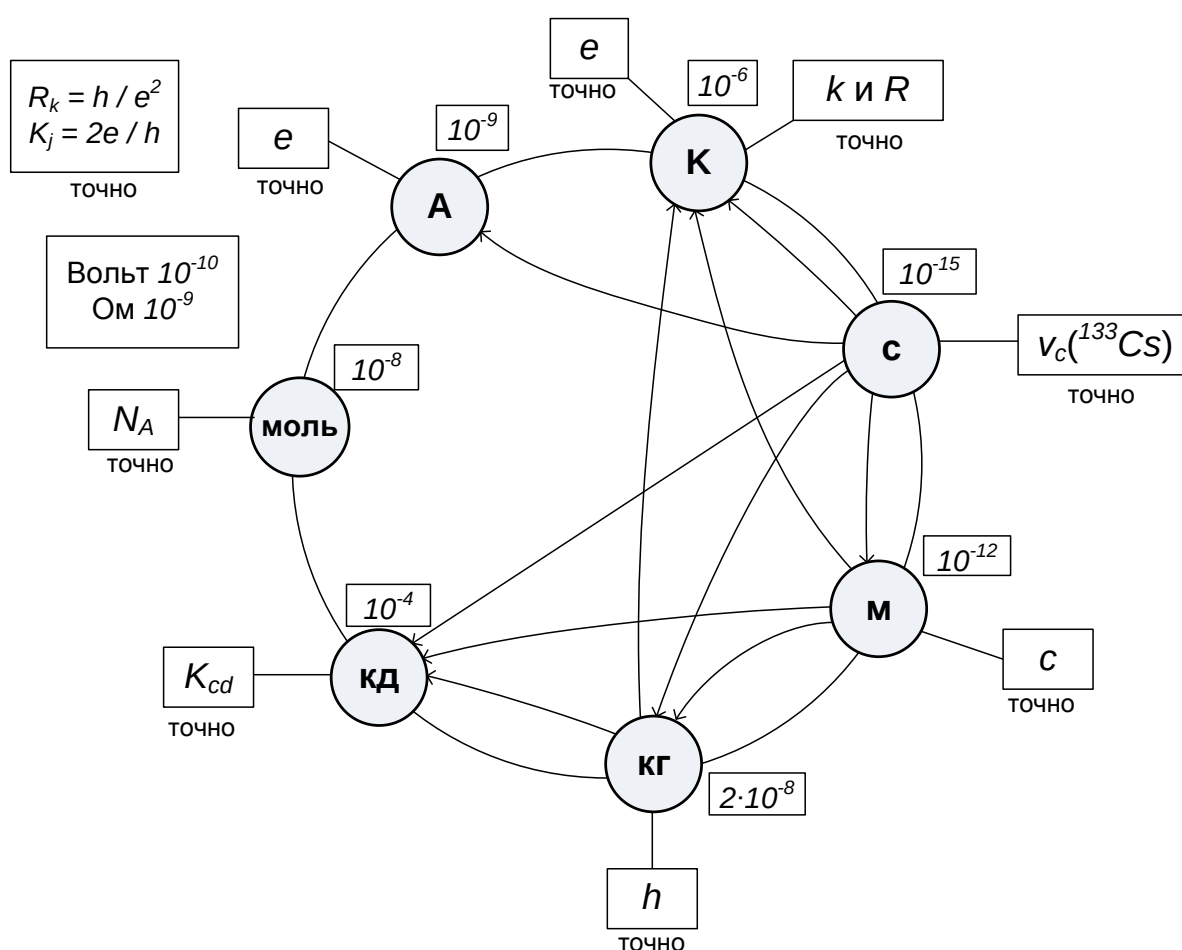


Рисунок 11.1 – Зв'язок основних одиниць з ФФС у New SI

Підпис «точно» під позначеннями сталих означає, що при вимірюваннях повинні використовуватись фіксовані значення сталих, установлені КОДАТА. На цьому рисунку вказані також найкращі (найменші) значення розширеної невизначеності відтворення одиниць, які можуть бути досягнутими в рамках нових визначень і методології, проголошених у New SI.

Очікується також позитивний вплив перевизначення основних одиниць на ФФС і на науку в цілому [44].

Фіксація h , e , k , N_A призводить до того, що точних значень набувають також стала Дірака $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, квант магнітного потоку $\Phi = \frac{h}{2e}$, квант провідності $G_0 = \frac{2e^2}{h}$, стала Фарадея $F = N_A \cdot h$, молярна стала Планка $N_A \cdot h$, стала Стефана–Больцмана, сталі опромінення і ряд інших. Важливо те, що значним позитивним моментом фіксації h , e , k , N_A стане зниження невідомості всіх інших сталих і зв'язку між ними, що має важливе значення для квантової фізики і науки в цілому.

Висновки

- У 2005 р. Консультативний комітет з одиниць при МКМВ запропонував перевизначити деякі основні одиниці SI через ФФС, а саме:
 - кілограм – через фіксацію сталої Планка h або сталої Авогадро N_A ;
 - ампер – через фіксацію елементарного заряду e ;
 - кельвін – через фіксацію сталої Больцмана k ;
 - моль – через фіксацію сталої Авогадро N_A .
- МКМВ сформулював основні умови перевизначення:
 - загальна структура SI, тобто основні величини SI та їх одиниці мають залишатися незмінними;
 - перевизначення повинні принести позитивні наслідки як для метрології, так і для науки в цілому;
 - зафіксовані значення h , e , k і N_A мають бути настільки близькі до їх значень у SI, наскільки це дозволяють сучасні знання.
- Були запропоновані два варіанти нових визначень: явні, що відображають фізичну суть одиниці, і через сталі. Після обговорення ГКМВ рекомендувала визначити всі основні одиниці через сталі. Для еквівалентності всіх формулювань ГКМВ запропонувала по-новому сформулювати існуючі визначення секунди, метра і кандели, залишивши незмінною їх прив'язку до частоти надтонкого розщеплення цезію-133, швидкості світла і спектральної сили світлового потоку монохроматичного випромінювання на частоті $540 \cdot 10^{12}$ Гц.
- На цей час (2017 р.) ГКМВ підтвердила принципову позицію щодо необхідності перевизначення кілограма, ампера, кельвіна і моля, сформу-

лювала нові визначення, однак призначила лише орієнтовну дату їх введення в дію (2018 р.), оскільки не всі умови для цього виконані.

- Аналіз запропонованих визначень показує, що вони є зрозумілими, однозначними і вказують шлях реалізації відповідних одиниць.

- Аналіз наслідків перевизначення одиниць показує, що вони будуть мати безумовно позитивні результати:

- для електричних вимірювань, оскільки підвищується точність і взаємоузгодженість одиниць, а також ліквідується дуалізм – паралельне існування практичних одиниць і одиниць SI;

- для вимірювань маси і пов'язаних з нею величин, оскільки усувається артефакт – прототип кілограма;

- для квантової фізики і науки в цілому, оскільки ряд сталих набувають точних значень, знижується невизначеність інших сталих і зв'язку між ними;

- очікуються також позитивні наслідки перевизначення кельвіна, хоча вони не так очевидні.

- Для введення в дію нових визначень і нової SI ще треба пройти деякий шлях для уточнення методології і апаратурних рішень, особливо щодо реалізації природного кілограма.

Контрольні питання

1. Що викликало необхідність реформи SI і створення New SI?
2. Назвіть основні недоліки існуючого сьогодні визначення кілограма.
3. Яку позицію займає сьогодні ГКМВ щодо перевизначень?
4. Які одиниці SI вже визначені через ФФС? Чи пропонуються зміни їх формулювань у New SI?
5. Які вимоги сформульовані МКМВ для офіційного перевизначення чотирьох основних одиниць?
6. Яким є стан з перевизначенням одиниць і впровадженням New SI на сьогодні?
7. Який позитивний ефект очікується від перевизначення одиниць у метрології і науці загалом?
8. У чому полягає суть New SI і яка її відмінність від SI?
9. Чи зміняться розміри основних одиниць з введенням New SI у порівнянні з існуючою SI?
10. Які сталі складають основу New SI?

ПІДСУМКИ

Упровадження квантових методів і використання ФФС у вимірювальній практиці привело до глибоких якісних змін не тільки у метрології, а й у більш широкому розумінні:

- у науково-технічному аспекті – розвинуто теоретичні питання ряду квантових явищ, надпровідності, розроблено нові методи вимірювань на їх основі, а також принципи побудови відповідних засобів вимірювання;
- в технологічному плані – створено нові унікальні технології виготовлення мікро- і наноструктур для побудови матриць Джозефсона, приладів для реалізації квантових ефектів Холла і одноелектронного тунелювання, однофотонних джерел і детекторів оптичного випромінювання, квантових стандартів частоти радіо- і оптичного діапазонів;
- у метрологічній практиці – досягнуто значний прогрес у підвищенні точності всіх видів вимірювань, у доступності найвищої точності широким колам метрологів, у спрощенні систем передачі розмірів одиниць робочим засобам вимірювання.

Стабільними тенденціями розвитку квантових методів і апаратури є:

- впровадження їх не тільки в первинні еталони, а і в засоби нижчої точності аж до робочих ЗВТ;
- удосконалення і спрощення технологій експлуатації квантових пристроїв (використання високотемпературної надпровідності і пристроїв без рідкого гелію тощо), що робить їх більш доступними для практичної метрології;
- суттєве розширення функціональних можливостей квантових пристроїв (використання квантових ефектів Джозефсона і Холла на змінному струмі тощо).

Аналізуючи досягнуті результати і темпи впровадження квантової метрології у практичну діяльність, можна прогнозувати таке:

- прийняття в найближчі роки нових визначень основних одиниць SI і введення New SI, що буде означати якісно новий етап розвитку метрології;
- подальший прогрес у створенні стабільних високотехнологічних еталонів на основі квантових явищ і природних інваріантів, більш широке впровадження квантових методів і технологій у робочі вимірювальні прилади;
- поступовий перегляд ідеології побудови систем забезпечення єдності вимірювань з урахуванням простежуваності не до еталонів, а до ФФС.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця Д1 – Значення деяких ФФС

Найменування величини	Позначення	Вихідне рівняння	Значення величини ± абсолютна похибка	Відносна похибка
Універсальні сталі				
Швидкість світла у вакуумі	c_0	–	299792458 м/с	точно
Магнітна стала	μ_0	–	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,566370614 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$	точно
Електрична стала	ε_0	$(\mu_0 c^2)^{-1}$	$8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$	точно
Гравітаційна стала	G		$(6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$	$128 \cdot 10^{-6}$
Стала Планка	h		$6,6260693(11) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Планківська маса	m_p	$(hc/2\pi G)^{1/2}$	$(2,17671 \pm 0,00014) \cdot 10^{-8} \text{ кг}$	$64 \cdot 10^{-6}$
Електромагнітні сталі				
Елементарний заряд	e	–	$1,60217653(14) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	$8,5 \cdot 10^{-9}$
Квант магнітного потоку	Φ_0	$h/2e$	$(2,0678337 \pm 0,00000061) \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Стала Джозефсона	$K_{Дж}$	$2e/h$	$(4,8359767 \pm 0,0000014) \cdot 10^{14} \text{ Гц} \cdot \text{В}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Стала Клітцинга	R_K	h/e^2	$25812,8056 \pm 0,0012 \text{ Ом}$	$0,43 \cdot 10^{-7}$
Гіромагнітне відношення протона	γ_p	–	$(26752,2128 \pm 0,0081) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ Тл}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Фізико-хімічні сталі				
Стала Больцмана	k	–	$1,3806505(24) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
Стала Авогадро	N_A	–	$6,0221415(10) \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Стала Фарадея	F	–	$96485,309 \pm 0,029 \text{ Кл/моль}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Уніфікована атомна одиниця маси	$a.о.м.$	–	$(1,6605402 \pm 0,0000010) 10^{-27} \text{ кг}$	$1 \cdot 10^{-7}$

Додаток 2

Таблиця Д2 – Похідні одиниці SI, що мають спеціальні назви

Найменування величини	Одиниця			
	Назва	Позначення		Співвідношення з одиницями SI
		укр.	міжнар.	
Площинний кут	радіан	рад	rad	$1 \text{ рад} = 1 \text{ м/м} = 1$
Просторовий кут	стерадіан	ср	sr	$1 \text{ ср м}^2/\text{м}^2 = 1$
Частота	герц	Гц	Hz	$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$
Сила, вага	ньютон	Н	N	$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м} / \text{с}^2$
Тиск, (механічне) напруження, модуль пружності	паскаль	Па	Pa	$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$
Енергія, робота, кількість теплоти	джоуль	Дж	J	$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$
Потужність, потік випромінення	ват	Вт	W	$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} / \text{с}$
Електричний заряд, кількість електрики	кулон	Кл	C	$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А}\cdot\text{с}$
Електричний потенціал, різниця потенціалів, (електрична) напруга, електрорушійна сила	вольт	В	V	$1 \text{ В} = 1 \text{ Вт} / \text{А}$
Електрична ємність	фарад	Ф	F	$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / \text{В}$
Електричний опір	ом	Ом	Ω	$1 \text{ Ом В} / \text{А}$
Електрична провідність	сіменс	См	S	$1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$
Магнітний потік (потік магнітної індукції)	вебер	Вб	Wb	$1 \text{ Вб} = 1 \text{ В}\cdot\text{с}$
Магнітна індукція, густина магнітного потоку	тесла	Т	T	$1 \text{ Т} = 1 \text{ Вб} / \text{м}^2$
Індуктивність, взаємна індуктивність	генрі	Гн	H	$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/м}$
Температура Цельсія	градус Цельсія	°C	°C	$1 \text{ °C} = 1 \text{ К}$
Світловий потік	люмен	лм	lm	$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд}\cdot\text{ср}$
Освітленість	люкс	лк	lx	$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} / \text{м}^2$
Активність (радіонукліду)	бекерель	Бк	Bq	$1 \text{ Бк} = 1 \text{ с}^{-1}$
Поглинута доза (йонізувального випромінення), питома передана енергія	грей	Гр	Gy	$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} / \text{кг}$
Еквівалентна доза (йонізувального випромінення)	зіверт	Зв	Sv	$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж} / \text{кг}$

Додаток 3

Таблиця ДЗ – Множники і префікси для утворення кратних та частинних одиниць

Множник	Префікс	Позначення	
		українське	міжнародне
$10000000000000000000000000 = 10^{24}$	йота	Й	Y
$1000000000000000000000000 = 10^{21}$	зета	ЗТ	Z
$1000000000000000000000000 = 10^{18}$	екса	Е	E
$1000000000000000000000000 = 10^{15}$	пета	П	P
$1000000000000000000000000 = 10^{12}$	тера	Т	T
$1000000000000000000000000 = 10^9$	гіга	Г	G
$1000000000000000000000000 = 10^6$	мега	М	M
$1000 = 10^3$	кіло	к	k
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санті	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	мілі	м	m
$0,000001 = 10^{-6}$	мікро	мк	μ
$0,000000001 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,0000000000001 = 10^{-12}$	піко	п	p
$0,0000000000000001 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,000000000000000001 = 10^{-18}$	атто	а	a
$0,00000000000000000001 = 10^{-21}$	зепто	з	z
$0,0000000000000000000001 = 10^{-24}$	йокто	й	y

Додаток 4

Таблиця Д4 – Порівняння визначень основних одиниць у SI і New SI

SI	New SI
Метр – довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за $1/299792458$ частини секунди. З цього визначення виходить, що швидкість світла у вакуумі, c_0, дорівнює $299\,792\,458$ м/с точно	Метр – одиниця довжини така, що швидкість світла у вакуумі дорівнює $299\,792\,458$ м/с точно
Кілограм – одиниця маси, що дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма З цього визначення виходить, що маса міжнародного прототипу кілограма завжди дорівнює 1 кг точно	Кілограм – одиниця маси така, що стала Планка дорівнює $6,62606 \times 10^{-34}$ Дж·с точно
Секунда – час, що дорівнює $9\,192\,631\,770$ періодам випромінювання, яке відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133. З цього визначення виходить, що надтонке розщеплення атома цезію-133 в основному стані, ν_{Cs}, дорівнює $9\,192\,631\,770$ Гц точно	Секунда – одиниця часу така, що надтонке розщеплення атома цезію-133 в основному стані, ν_{Cs}, дорівнює $9\,192\,631\,770$ Гц точно
Ампер – сила незмінного електричного струму, який під час протікання по двох нескінченно довгих паралельних прямолінійних провідниках 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 у $2 \cdot 10^{-7}$ Н. З цього визначення виходить, що магнітна стала μ_0 дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м точно	Ампер – одиниця електричного струму така, що чисельне значення елементарного заряду дорівнює $1,60217 \times 10^{-19}$ Кл точно
Кельвін – одиниця термодинамічної температури, яка дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води З цього визначення виходить, що термодинамічна температура потрійної точки води $T_{ПТВ}$ дорівнює $273,16$ К точно	Кельвін – одиниця термодинамічної температури така, що чисельне значення сталої Больцмана дорівнює $1,3806 \times 10^{-23}$ Дж/К точно
Кандела – сила світла в заданому напрямку від джерела монохромного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку становить $1/683$ Вт/ср*. З цього визначення виходить, що спектральна сила світла $K(\lambda_{555})$ для монохромного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц дорівнює 683 лм/Вт точно	Кандела – сила світла в заданому напрямку така, що спектральна сила світла для монохромного випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$ Гц дорівнює 683 лм/Вт точно
Моль – кількість речовини, яка містить стільки структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою $0,012$ кг. При використанні моля повинні бути визначені структурні елементи, якими можуть бути окремі атоми, молекули, іони, інші частинки або певні групи таких частинок. З цього визначення виходить, що молярна маса вуглецю-12, $M(^{12}\text{C})$, дорівнює 12 г/моль точно	Моль – кількість речовини така, що чисельне значення сталої Авогадро $6,02214 \times 10^{23}$ моль⁻¹ точно

* X – одна або кілька додаткових цифр, які визначаються останнім установленням КОДАТА

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Ампер, 25, 26, 70, 150, 163, 220, 223

В

Вимірювання параметрів інтенсивності, 155

Відтворення ємності, 125

Відтворення індуктивності, 124, 125

Відтворення люмена, 211

Відтворення одиниць активного опору, 124

Вольт, 70, 152

Г

Газотермометричні вимірювання, 193

Гіромагнітне відношення протона, 22, 143

Д

Джозефсонівська міра напруги, 103

Е

Електрична стала, 22

Елементарний заряд, 20

Еталон електричної ємності, 130

Еталон змінного струму, 155

Еталон змінної напруги, 155

Еталон магнітної індукції, 140

Еталон маси, 165

Еталон напруги змінного струму, 87

Еталон одиниці електричної потужності, 157

Еталон одиниці опору, 118

Еталон одиниці потужності ВЧ і НВЧ-діапазонів, 158

Еталон одиниць напруженості електромагнітного поля, 158

Еталон потужності, 102

Еталон сили світла, 201

Еталон сильних магнітних полів, 141

Еталон температури, 189

Еталони одиниць часу, 44

Ефект Джозефсона, 16, 73, 78, 96, 103, 104, 151

Ефект Мейснера, 16

Ефект ядерного магнітного резонансу, 18, 134, 137

Є

Єдиний еталон одиниць часу, частоти і довжини, 61

Єдність вимірювань, 9

К

Калібрування, 10

Кандела, 24, 26, 204, 205, 211, 223

Квантовий вольтметр, 100

Квантовий ефект Холла, 18, 107, 121, 127, 130

Квантовий магнітний перетворювач, 144

Квантовий стандарт частоти, 32, 33, 37, 41, 230

Квантування, 14

Кельвін, 26, 220, 224

Кілограм, 26, 223

Кодоімпульсний метод, 89

*Комбінований (PJVS+JAWS)
метод, 94*

Криптоновий метр, 52

Куперівські пари, 17

М

Магнітна стала, 21

*Матриця контактів Джозефсона,
80*

Метод PJVS, 92

Метод звірення частот лазерів, 58

Метод синтезу відліків, 87

*Методи відтворення природного
кілограма, 168*

Метр, 26, 51, 53, 223

*Метрологічна простежуваність,
9, 10*

*Міжнародна температурна шкала
МТШ-90, 185*

*Молекулярний стандарт частоти,
34*

Моль, 26, 177, 220, 224

Н

*Надпровідний квантовий
інтерферометричний датчик, 96*

Надпровідність, 16

Невизначеність вимірювання, 10

Нова SI (New SI), 161, 218

О

Ом, 71

*Опосередковане відтворення
ампера, 149*

П

Первинний еталон метра, 54, 62

*Первинний еталон постійної
напруги, 81*

Перевизначення кельвіна, 191, 197

Перевизначення моля, 177

*Промисловий ЯМР-тесламетр,
145*

Пряме відтворення ампера, 152

Р

Розрахунковий конденсатор, 72

Рубідієвий стандарт частоти, 34

С

Світловий метр, 53

Секунда, 26, 31, 222

Система SI, 25

*Система еталонів практичної SI,
160*

*Спектральна сила світлового
потoku, 23*

Стала Авогадро, 20

Стала Больцмана, 20, 191

Стала Джозефсона, 24

Стала Клітцинга, 24

Стала Планка, 14, 19

Т

*Термометрія за доплерівським
розширенням лінії, 196*

Тунелювання електронів, 15, 74

Ф

Фемтосекундний лазер, 63

*Фундаментальна фізична стала,
13*

Ц

Цезієвий фонтан, 45

Ч

Частота надтонкого переходу в цезії, 23

Частотна гребінка, 57, 59

Ш

Швидкість світла, 19

Шкала атомного часу, 49

Шумова термометрія, 195

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Квантовая метрология и фундаментальные константы. Сборник статей; пер. с англ. – М. : Изд-во «Мир», 1981. – 368 с.
2. Planck M. // Ständiger Beobachter der Preußischen Akademie der Wissenschaften. – 1899. – P. 440; Annalen der Physik. – 1900. – V. 1. – P. 69.
3. Stoney G. J., Rohrer H. // The philosophical magazine and journal of science. – 1881. – V. 11. – P. 381.
4. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Минск : РМГ 29-99. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 46 с.
5. Josephson B. // Phys. Lett. – 1962. – V. 1. – P. 251.
6. Klitzing K. New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance / K. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V. 45. – № 6. – P. 494 – 497.
7. Purcell, Torrey, Paund // Phys. Rev. Mod. Phys. – 1946. – V. 18. – P. 323.
8. Bloch, Hansen, Packard // Phys. Rev. – 1946. – V. 69 – P. 127.
9. Кононогов С. А. Метрология и фундаментальные физические константы / С. А. Кононогов. – М. : Стандартиформ, 2008. – 269 с.
10. Гиббс Дж. В. Основные принципы статистической физики / Дж. В. Гиббс. – М. : ГИТТЛ, 1946. – 204 с.
11. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення : ДСТУ 3651. 0-97. – [Чинний від 1997-10-09]. – Офіц. вид. – Київ : Держстандарт України, 1998. – 14 с.
12. Завельский Ф. С. Время и его измерение / Ф. С. Завельский. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
13. Аппаратура для частотных и временных измерений; под ред. А. П. Горшкова. – М. : Изд-во «Советское радио», 1971. – 336 с.
14. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике : под ред. В. К. Коробова. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 296 с.
15. Державний первинний еталон одиниці часу і частоти / О. С. Клейман, В.П. Оголюк, Г.С. Сидоренко та ін. // Український метрологічний журнал. – 1997. – Вип. 3. – С. 18–23.
16. Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology / H. Katori // Nature Photon. – 2011. – № 5. – P. 203-210.

17. Григорьянц В. В. Квантовые стандарты частоты / В. В. Григорьянц, М. Е. Жаботинский, В. Ф. Золин. – М. : Изд-во «Наука», 1967. – 288 с.
18. Оптические стандарты частоты. Ч. 1. / Ю. П. Мачехин, А. М. Негрийко, В. С. Соловьев, Л. П. Яценко. – Харьков : Коллегиум, 2010. – 144 с.
19. Зимоков Г. А. Государственный первичный эталон единицы длины / Г. А. Зимоков, Ю. П. Мачехин, В. П. Оголюк и др. // Украинський метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 4. – С. 39–45.
20. Кононогов С. А. Метрологические основы электрических измерений / С. А. Кононогов, И. Я. Краснополин, С. Г. Семенчинский. // Метрология. – 2006. – № 5. – С. 5–51.
21. Lampard D. G. // Proc. IEEE Monograph 216M, 104 с, 271 (1957).
22. Thompson A. M. A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance / A. M. Thompson, D. G. Lampard // Nature. – 1956. – V. 177. – № 4515. – P. 888.
23. Shapiro S. // Phys. Rev. Lett. – 1963. – V. 11 – P. 109.
24. Тейлор Б. Фундаментальные константы и квантовая электродинамика / Б. Тейлор, В. Паркер, Д. Лангенберг. – М. : Атомиздат, 1972.
25. Popel R. The Josephson Effect and Voltage Standards / R. Popel // Metrologia. – 1992. – V. 29. – P. 153-174.
26. Нимайер Ю. Матрицы Джозефсона для динамических измерений напряжения / Ю. Нимайер // Украинський метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 1. – С. 5–11.
27. Новий державний еталон одиниці ЕРС і сталої напруги / В. В. Анікін, Ю. Ф. Павленко, О. І. Колбасін та ін. // Украинський метрологічний журнал. – 2007. – Вип. 2. – С. 21–26.
28. Нимайер Ю. Матрицы Джозефсона для прецизионных измерений напряжений постоянного и переменного тока / Ю. Нимайер // Труды международной конференции «Метрология 2008». – Харьков: ННЦ «Институт метрологии», 2008. – С. 16–21.
29. Забезпечення єдності електрорадіовимірювань : підручник / за ред. проф. Ю. Ф. Павленка [Павленко Ю.Ф., Кондрашов С.І., Несажмаков П.І., Маслова Н.М.] – Харків : Вид-во «Підручник НТУ ХПІ», 2014. – 235 с.
30. Нимайер Ю. Современное состояние метрологии в области джозефсоновского напряжения переменного тока [Електроний ресурс] /

Ю.Нимайер и др. // Труды международной конференции «Метрология 2012». Х.: ННЦ «Институт метрологии», 2012. – С. 12–15.

31. Эффект Джозефсона в метрології: сучасний стан / Ю.Ф. Павленко, П.І. Неєжмаков, Н.М. Маслова, В.В. Анікін // Український метрологічний журнал – 2015. – Вип.3. – С. 3–15.

32. Schurr J. The Josephson two-terminal-pair impedance bridge / Schurr J., Nissilä J., Palafox L. and Behr R. – Metrologia. 2010. – Vol. 47. – P. 453-459.

33. Ларкин С.Ю. Измерение частоты монохроматического СВЧ поля на основе нестационарного эффекта Джозефсона / С.Ю. Ларкин– Киев : Наукова думка, 1999. – 271 с.

34. Кибис О.В. Квантовый эффект Холла / О.В. Кибис // Соросовский образовательный журнал. – 1999 г. – № 9. – С. 89–93.

35. Schurr J. The ac quantum Hall resistance as an electrical impedance standard and its role in the SI / Schurr J., Ahlers F. and Kibble B. P. // Meas. Sci. Technol. – 2012. – Vol. 23. – 20 pp.

36. Quantum- Hall model 6800A. Operators manual.

37. Павленко Ю.Ф. Державний первинний еталон одиниці електричного опору / Ю.Ф. Павленко, Г.С. Сидоренко, В.В. Анікін та ін. // Український метрологічний журнал. – 1998. – Вип. 4. – С. 26–28.

38. Павленко Ю. Ф. Відтворення параметрів імпедансу електричних кіл у системах одиниць SI і New SI / Ю. Ф. Павленко, П. І. Неєжмаков, Н. М. Маслова, В.В. Анікін // Український метрологічний журнал. – 2015. – Вип.1. – С.12–20.

39. Зингерман В. И. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции / В. И. Зингерман // Український метрологічний журнал. – 1996. – Вип. 2, 3. – С. 36–40.

40. Павленко Ю. Ф. Використання ефекту ядерного магнітного резонансу для відтворення електричних одиниць у NEW SI / Ю. Ф. Павленко, П. І. Неєжмаков, Н. М. Маслова // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 3. – С. 3–10.

41. Катков А. С. Государственный первичный эталон единицы силы постоянного тока / А. С. Катков, И. В. Короткова, О. М. Павлов // Измерительная техника. – 1995. – № 1. – С. 3–4.

42. Likharev K. , Zorin A. // J. Low Temp. Phys. – 1985. – V. 59. – P. 347.

43. Неєжмаков П.І. Реформа SI і її вплив на систему відтворення електричних одиниць / Неєжмаков П.І., Павленко Ю.Ф., Маслова Н.М., Анікін В.В. // Український метрологічний журнал – 2013. – Вип.1. – С. 3-10.
44. Миллс Я. М. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моль : предлагаемый подход к применению Рекомендации 1 МКМВ (C1-2005) / Я. М. Миллс, П. Дж. Мор, Т. Дж. Квинн и др. // Метрология. – 2007. – № 2. – С. 5–57.
45. Olsen P. T. e. a. // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1989. – V. 38. – P. 159.
46. Uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram / R. L. Steiner, E. R. Williams, D. B. Newell e. a. // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2007. – V. 56, № 2. – P. 592–596.
47. Determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal / B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl e. a. // Phys. Rev. Lett. – 2011. – V. 106, № 2. – P. – 030801.
48. BIPM. CCM Workshop on the mise en pratique of the New definition of the Kilogram. November, 2012.
49. Завершение работ по созданию нового исходного эталона массы ; пер. В. Красовского // Метрология и приборостроение. – Минск. – 2013. – № 1. – С.44–45.
50. Назаренко Л.А. Температурная метрология в ХГНИИМ / Л.А. Назаренко // Украинский метрологический журнал. – 1996. – Вип.4. – С. 33-37.
51. Неєжмаков П. На шляху до нового визначення кельвіна / П. Неєжмаков, Ю. Павленко, Л. Назаренко // Метрологія та прилади. – 2013. – № 6(44). – С. 3–9.
52. Назаренко Л.А. Эталонная фотометрия (Эволюция единиц и метрологическая конвенция) / Л.А. Назаренко // Украинский метрологический журнал. – 2000. – Вип.1. – С. 29–35.
53. Fox N. P. Trap detectors and their properties / N. P. Fox // Metrologia. – 1991. – Vol. 28. – № 3. – P. 197–202.
54. Неєжмаков П. І. Державний первинний еталон одиниці світлового потоку / П. І. Неєжмаков, Л. В. Грищенко, М. В. Гур'єв, Л. А. Назаренко // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 4. – С. 20–32.
55. Клышко Д. Н. Перспективы квантовой фотометрии / Д. Н. Клышко, А. Н. Пеннин // Успехи физических наук. – 1989. – Вып. 4. – С. 653–665.

56. Назаренко Л. А. Квантова радіометрія та фотометрія / Л. А. Назаренко, П. І. Неєжмаков, Є. П. Тимофєєв // Український метрологічний журнал. – 2012. – № 1. – С. 30–35.

57. XXIV CGPM, Paris, 2011. 24 CGPM Resolution 1. Резолюція 1 24-ї Генеральної конференції з мір та ваг. – Париж, 2011.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	3
ПЕРЕДМОВА.....	5
ВСТУП.....	6

Розділ 1. МЕТОДОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ КВАНТОВОЇ МЕТРОЛОГІЇ

1.1. Основні поняття і терміни.....	9
1.2. Елементи сучасної фізичної картини світу і квантова метрологія.....	12
1.3. Фізичні ефекти, що використовуються у квантовій метрології.....	14
1.3.1. Квантування і квантова механіка	14
1.3.2. Тунелювання електронів	15
1.3.3. Надпровідність і ефект Мейснера	16
1.3.4. Об'єднання електронів у куперівські пари.....	17
1.4. Макроскопічні квантові ефекти.....	17
1.5. Фундаментальні фізичні сталі	18
1.6. SI і квантова метрологія	25
Висновки.....	28
Контрольні питання.....	28

Розділ 2. СЕКУНДА: ВІД «АСТРОНОМІЧНОЇ» ДО «КВАНТОВОЇ» СЕКУНДИ

2.1. Коротка історія.....	30
2.2. Фізичні основи квантових стандартів частоти	32
2.3. Молекулярний і рубідієвий стандарти часу-частоти	34
2.3.1. Квантовий молекулярний генератор на аміаку	34
2.3.2. Рубідієвий стандарт частоти.....	35
2.4. Квантовий стандарт частоти на цезії	37
2.5. Квантовий стандарт частоти на атомах водню	41
2.6. Первинні еталони одиниць часу і частоти та перспективи їх розвитку	44
2.7. Одиниці і шкали часу	48
Висновки	49
Контрольні питання.....	50

Розділ 3. МЕТР. ВІД АРТЕФАКТУ ДО «СВІТЛОВОГО» МЕТРА	51
3.1. Коротка історія.....	51
3.2. Лазер і «світловий» метр.....	53
3.3. Первинний еталон метра.....	54
3.3.1. Еталонне джерело світлового випромінювання	54
3.3.2. Система вимірювання частоти лазера	57
3.3.3. Система передачі розміру одиниці мірам довжини	60
3.4. Первинний еталон одиниці довжини України.....	61
3.5. Перспектива удосконалення – фемтосекундний лазер.....	62
Висновки	67
Контрольні питання	68

Розділ 4. ЕФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА І ЕЛЕКТРИЧНІ

ВИМІРЮВАННЯ.....	69
4.1. Коротка історія.....	69
4.2. Фізичні основи ефекту Джозефсона	72
4.3. Апаратура для відтворення напруги постійного струму на основі ефекту Джозефсона.....	77
4.4. Первинний еталон України.....	80
4.4.1. Структурна схема еталона	80
4.4.2. Метрологічні характеристики еталона	83
4.5. Відтворення напруги змінного струму на ефекті Джозефсона.....	85
4.5.1. Метод синтезу відліків	85
4.5.2. Кодоімпульсний метод.....	86
4.5.3. Метод з використанням частотної модуляції НВЧ-опромінення	89
4.5.4. Комбінований (PJVS+JAWS) метод	92
4.6. Застосування ефекту Джозефсона у промисловості і приладобудуванні.....	93
4.6.1. Надпровідний квантовий інтерферометричний датчик (НКВІД).....	94
4.6.2. Квантовий вольтметр.....	97
4.6.3. Апаратура Supra VOLT control (Німеччина).....	98
4.6.4. Міст для вимірювання імпедансів на змінному струмі з фундаментальною точністю	99
4.6.5. Еталон потужності на промисловій частоті.....	100

4.6.6. Джозефсонівська міра напруги без рідкого гелію.....	100
4.6.7. Міра з використанням високотемпературної надпровідності	101
4.6.8. Інші сфери застосування	101
Висновки.....	101
Контрольні питання	102

Розділ 5. КВАНТОВИЙ ЕФЕКТ ХОЛЛА І ВИМІРЮВАННЯ

ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	104
5.1. Фізичні основи квантового ефекту Холла.....	104
5.2. Міра електричного опору на квантовому ефекті Холла	109
5.3. Структурна схема еталона електричного опору на квантовому ефекті Холла	115
5.4. Первинний еталон одиниці електричного опору України.....	116
5.5. КЕХ і відтворення параметрів електричних кіл	118
5.5.1. Розрахунковий конденсатор	119
5.5.2. Відтворення одиниць активного опору і індуктивності за допомогою розрахункового конденсатора.....	121
5.5.3. Відтворення ємності і індуктивності за допомогою холлівської міри опору на постійному струмі	122
5.5.4. Використання квантового ефекту Холла на змінному струмі	124
5.5.5. Стан в Україні	126
5.6. Перспектива розвитку – квантовий ефект Холла на графені	127
Висновки	128
Контрольні питання	129

Розділ 6. ЕФЕКТ ЯДЕРНОГО МАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ

І ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВИМІРЮВАННЯ	130
6.1. Фізичні основи ефекту ЯМР	130
6.2. Коротка історія застосування ефекту ЯМР у метрології.....	133
6.3. ЯМР і еталони одиниці магнітної індукції.....	136
6.4. ЯМР і магнітні вимірювання	140
6.4.1. Квантові магнітні перетворювачі	140
6.4.2. Промисловий ЯМР-тесламетр	141
6.5. Інші використання ЯМР: наука, техніка, медицина.....	143

Висновки	143
Контрольні питання	144

Розділ 7. КВАНТОВІ ЕФЕКТИ І НОВА СИСТЕМА

ЕЛЕКТРИЧНИХ ЕТАЛОНІВ	145
7.1. Відтворення ампера на основі квантових ефектів.....	145
7.1.1. Опосередковане відтворення ампера.....	145
7.1.2. Перспектива прямого відтворення ампера на основі ефекту одноелектронного тунелювання.....	148
7.2. Квантові ефекти і вимірювання параметрів інтенсивності	151
7.2.1. Еталони змінної напруги і змінного струму	151
7.2.2. Еталони одиниці електричної потужності на промисловій і низьких частотах	153
7.2.3. Еталони одиниці потужності ВЧ і НВЧ- діапазонів	154
7.2.4. Еталони одиниць напруженості електромагнітного поля	154
7.3. Нова система відтворення електричних одиниць.....	154
Висновки	159
Контрольні питання	160

Розділ 8. КВАНТОВА МЕТРОЛОГІЯ І ПРИРОДНИЙ ЕТАЛОН

МАСИ	161
8.1. Історія визначення кілограма	161
8.2. Типова структура еталона кілограма і еталон України	162
8.3. Методи відтворення природного кілограма.....	164
8.3.1. Визначення через сталу Авогадро («атомний» кілограм)	164
8.3.2. Визначення через сталу Планка («електричний» кілограм) ..	167
8.4. Умови, які необхідно виконати для перевизначення кілограма	169
8.4.1. Забезпечення неперервності вимірювань маси і пов'язаних з нею величин.....	169
8.4.2. Забезпечення поширення перевизначеного кілограма.	170
8.5. Одиниця кількості речовини – моль і стала Авогадро.....	173
8.5.1. Передумови і суть перевизначення моля	173
8.5.2. Наслідки перевизначення моля	174
Висновки	174
Контрольні питання	176

Розділ 9. КЕЛЬВІН: ШЛЯХ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЧЕРЕЗ ФФС	177
9.1. Історія питання.....	177
9.2. Міжнародна температурна шкала МТШ-90.....	181
9.2.1. Контактна термометрія	181
9.2.2. Оптична термометрія.....	182
9.2.3. Термометрія в інфрачервоній області спектра	183
9.3. Первинні еталони одиниці температури і еталони України.....	185
9.3.1. Еталон у діапазоні низьких температур: 13,803–273,16 К	185
9.3.2. Еталон у діапазоні 273,16–1357,77 К.....	185
9.3.3. Еталон у діапазоні 1357,77–2800 К.....	185
9.3.4. Еталон температури в ІЧ-діапазоні 692,64–1234,93 К.....	186
9.4. Шлях до нового визначення кельвіна	187
9.4.1. Передумови перевизначення	187
9.4.2. Підвищення точності вимірювання сталої Больцмана – необхідна умова перевизначення кельвіна.....	188
9.4.3. Газотермометричні вимірювання.....	189
9.4.4. Шумова термометрія	191
9.4.5. Термометрія за доплерівським розширенням лінії	192
9.4.6. Останні результати з уточнення сталої Больцмана.....	192
9.5. Наслідки перевизначення. Статус МТШ-90	193
Висновки	194
Контрольні питання	195

Розділ 10. СВІТЛОВІ ВИМІРЮВАННЯ: ВІД СВІЧКИ ДО КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....

КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ	197
10.1. Із історії світлових (фотометричних) еталонів	197
10.2. Еталони одиниці сили світла на основі приймача.....	202
10.2.1. Еталон кандели на основі приймача-радіометра.....	202
10.2.2. Приймач на основі фотодетектора	203
10.2.3. Приймач на основі трап-детектора	205
10.3. Первинний еталон України одиниці сили світла – кандели	206
10.4. Відтворення одиниці світлового потоку – люмена. Еталон України.....	207
10.5.Про перспективу квантового перевизначення світлових одиниць	210
Висновки	211
Контрольні питання	212

Розділ 11. НОВА ВЕРСІЯ SI (NEW SI)	213
11.1. Перевизначення одиниць і нова SI	213
11.1.1. Явні визначення одиниць	214
11.1.2. Визначення через сталі	215
11.2. Стан на сьогодні (2017 р.)	215
11.3. Аналіз запропонованих визначень основних одиниць	217
11.3.1. Секунда, метр, кандела	217
11.3.2. Кілограм	218
11.3.3. Ампер	218
11.3.4. Кельвін	219
11.3.5. Моль	219
11.4. Наслідки впровадження нової SI	219
Висновки	222
Контрольні питання	223
ПІДСУМКИ	224
ДОДАТКИ	225
Додаток 1	226
Додаток 2	227
Додаток 3	228
Додаток 4	229
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	232
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	237

Навчальне видання

Павленко Юрій Федорович, **Кондрашов** Сергій Іванович,
Неєжмаков Павло Іванович, **Маслова** Наталія Михайлівна,
Дроздова Тетяна Василівна

За загальною редакцією **Павленка** Юрія Федоровича

Вступ до квантової метрології

Підручник

для студентів вищих технічних навчальних закладів

Відповідальний за випуск *С. І. Кондрашов*

Роботу до видання рекомендував *А.М. Борисенко*

Редактор *О.І. Шнільова*

План 2016 р., поз. 65

Підп. до друку 2.08.2017. Формат 60х84 1/16. Папір офсетний. Друк
цифровий. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 12,2; обл.-вид.арк 15,25
Наклад 50 прим. Зам. № 18.07.2017 Ціна договірна

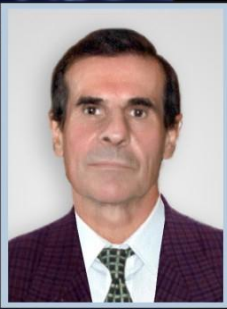
Видавець: ФОП Мезина В.В.

Свідоцтво реєстрації ДК № 5365 від 21.06.2017 р.

М. Харків, вул. Жон Мироносиць, 6/8

Тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87, +38(098)837-75-53

book@vdele.in.ua



Павленко Юрій Федорович - доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Національного наукового центру «Інститут метрології», професор кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології і системи» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»



Кондрашов Сергій Іванович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології і системи» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», академік Української технологічної академії, академік Академії метрологів України



Несжмаков Павло Іванович - доктор технічних наук, професор, генеральний директор Національного наукового центру «Інститут метрології»



Маслова Наталія Михайлівна - старший науковий співробітник Національного наукового центру «Інститут метрології»



Дроздова Тетяна Василівна - асистент кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології і системи» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»