

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ЦЕНТР ВИЩОЇ ОСВІТИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ХПІ”

Ю.Ф. Павленко, І.П. Захаров, С.І. Кондрашов, В.К. Гусельніков

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ЕЛЕКТРОРАДІОВИМІРЮВАНЬ

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів

За редакцією д.т.н., проф. Ю.Ф. Павленка

Харків 2011

Перелік умовних позначень та скорочень

АМ – амплітудна модуляція
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ВЕ – вторинний еталон
ВНИИМ – Всеросійський науково-дослідний інститут метрології
ВНИИФТРИ – Всеросійський науково-дослідний інститут фізико-технічних та радіовимірювань
ВП – вимірювальний прилад
ВЧ – висока частота
ГКМВ (CGPM) – Генеральна конференція з мір та ваг
ГШ – генератор шуму
ДЕ – державний еталон
ДН – дільник напруги
ДССДД – державна служба довідкових даних;
ДСТУ – державний стандарт України
ДФП – джерело фіктивної напруги
ЕЛЧ – електронно-лічильний частотомір
ЕРВ – електрорадіовимірювання
ЕРС – електрорушійна сила
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
ЗВТ – засоби вимірювальної техніки
ЗЄВ – забезпечення єдності вимірювань
КВ – коефіцієнт відбиття
КГ – коефіцієнт гармонік
КОДАТА – комітет стандартних даних
КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі за напругою
ЛЗ – лінія затримки
МБМВ (BIPM) – Міжнародне бюро з мір та ваг
МДН – метал-діелектрик-напівпровідник
МКМВ (CIPM) – Міжнародний комітет з мір та ваг
НВЧ – надвисока частота
НЕ – нелінійний елемент
НІ – нуль-індикатор
НКВІД – надпровідний квантовий інтерференційний детектор
НМІ – Національний метрологічний інститут
НМХ – нормована метрологічна характеристика
ННЕ – насичений нормальний елемент
НСП – невилучена систематична похибка
НЧ – низька частота
ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина
РЕ – робочий еталон
РОЧМ – радіооптичний частотний міст
СВПП – система відтворення потужності поглинання

СДД – стандартні довідкові дані;
СЗ – стандартний зразок речовин та матеріалів
СКВ – середньоквадратичне відхилення
СКВИД – надпровідний квантовий інтерференційний прилад
СКЗ – середньоквадратичне значення
СГПШ – спектральна густина потужності шуму
ТП – термоперетворювач
ТТМ – твердотільна міра
ФАПЧ – фазова автопідстроювання частоти
ФВ – фізична величина
ФМ – фазова модуляція
ФСС – фундаментальні фізичні сталі
ЦОВМ – центральний орган виконавчої влади
ЧМ – частотна модуляція
ЯМР – ядерний магнітний резонанс
BNM – Національне бюро з метрології Франції
COOMET – Євро-Азіатська організація державних метрологічних установ
EURAMET – Європейська організація національних метрологічних інститутів
IEC – Міжнародна електротехнічна комісія
ISO – Міжнародна організація зі стандартизації
NIST – Національний інститут стандартів та технологій (США)
NPL – Національна фізична лабораторія (Англія)
OIML – Міжнародна організація законодавчої метрології
PTB – Фізико-технічний федеральний заклад (Німеччина)
SI – міжнародна система одиниць
SIS – надпровідник-ізолятор-надпровідник
SINIS – надпровідник-ізолятор-нормальний метал-ізолятор-надпровідник
SNS – надпровідник-нормальний метал-надпровідник
SMD – прилад, що монтується на поверхні

ВСТУП

У розвитку науки і техніки, створенні нових технологій, підвищенні обороноздатності країни, поліпшенні якості промислової та сільськогосподарської продукції надзвичайно важливу роль відіграють вимірювання, досягнення їх необхідної точності та достовірності або **забезпечення єдності вимірювань**.

У першому розділі посібника розкривається суть поняття єдності вимірювань. Показано, що технічною основою системи забезпечення єдності вимірювань є первинні еталони, з яких починається “народження” одиниць вимірювань, а точність їх відтворення і передачі визначає рівень і якість вимірювань в країні.

Особливості еталонів як вихідних засобів вимірювальної техніки, загальні питання їх побудови і нормування метрологічних характеристик наводяться у другому розділі.

У третьому розділі подається еволюція розвитку і сучасний стан первинних еталонів основних одиниць міжнародної системи SI.

Розділ 4 присвячений системі еталонів у галузі електрорадіовимірювань, а також новому напрямку в системі забезпечення єдності вимірювань (ЗЄВ) – квантовій метрології. Показано, що еталони, побудовані на квантових ефектах, становлять основу системи еталонів в цій галузі.

В розділах 5,6,7 наводяться принципи побудови еталонів параметрів інтенсивності, кіл і трактів, що використовують в електрорадіовимірюваннях.

Розділ 8 присвячений проблемі метрологічного забезпечення засобів вимірювання параметрів електричних і радіотехнічних сигналів: вимірювальних генераторів, осцилографів, аналізаторів спектра, модулометрів, і т.і., яка вирішується як шляхом створення спеціальних еталонів, так і шляхом простежування до еталонів в інших галузях вимірювань.

У посібнику розглядаються також проблеми можливого подальшого вдосконалення еталонів, розвитку квантової метрології як найбільш перспективного напрямку вдосконалення системи ЗЄВ, а також питання перевизначення деяких основних одиниць і його впливу на подальший розвиток метрології в електриці і радіоелектроніці.

Матеріал посібника відповідає програмі курсу “Забезпечення єдності вимірювань”, а також буде корисним для курсів “Основи метрології” та “Актуальні проблеми метрологічного забезпечення”.

1 ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

1.1 Про термін “єдність вимірювань”

У відповідності до чинної термінології

вимірювання – відображення фізичних величин їх значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів;

єдність вимірювань – стан вимірювань, за якого їх результати виражаються в узаконених одиницях вимірювань, а характеристики похибок або невизначеності вимірювань відомі та із заданою ймовірністю не виходять за встановлені границі.

Уточнимо трактовку деяких термінів, що входять до понять “вимірювання” і “єдність вимірювань”.

Величина (фізична) – властивість, спільна в якісному відношенні у багатьох матеріальних об’єктів та індивідуальна в кількісному відношенні у кожного з них.

Одиниця вимірювань – фізична величина певного розміру, прийнята для кількісного відображення однорідних з нею величин.

Якщо є деяка величина X , а для її вимірювання прийнята одиниця вимірювань $[X]$, то значення фізичної величини $X = q[X]$, де q – числове значення вимірюваної фізичної величини (ФВ). Рівняння, що пов’язує числове значення величини з розміром прийнятої одиниці вимірювань, зветься основним рівнянням вимірювань.

Забезпечення єдності вимірювань – головне завдання метрології. Воно є необхідним для зіставлення результатів вимірювань, виконаних у різний час, у різних місцях, різними методами і засобами, різними експериментаторами. Вся метрологічна діяльність – це діяльність, яка пов’язана із забезпеченням єдності вимірювань.

1.2 Міжнародна система одиниць

В Україні у відповідності до Закону “Про метрологію та метрологічну діяльність” [1] діє Міжнародна система одиниць (SI), яка прийнята у 1960 році XI Генеральною конференцією з мір та ваг (ГКМВ). Відповідні державні стандарти ДСТУ 3651. 0-2:97 [2 – 4] повністю відповідають стандартам ISO 31(0 – 13) “Величини та одиниці” (1992) та ISO 1000 “Одиниці SI та рекомендації з використання їх частинних, кратних та інших одиниць”.

Міжнародна система одиниць має такі позитивні риси:

універсальність, що забезпечує її використання в науці, техніці і господарстві;

уніфікованість одиниць для всіх видів вимірювання;

когерентність (узгодженість) системи: коефіцієнти пропорційності у фізичних рівняннях для визначення похідних величин дорівнюють одиниці;

використання зручних для практичних вимірювань основних та похідних

одиниць;

чітке розмежування одиниць маси (кілограм) і сили (ньютон);

спрощений запис рівнянь і формул завдяки відсутності перехідних коефіцієнтів переведення з однієї системи в іншу;

позбавлення необхідності визначати всі системи одиниць;

сприяння розвитку міжнародних економічних зв'язків.

У 1954 р. X ГКМВ затвердила основні одиниці Міжнародної системи одиниць, які мають охоплювати всі галузі науки і техніки, бути основою для утворення похідних одиниць, забезпечувати зручність для практичних вимірювань і відтворюватися за допомогою установок і еталонів з найбільшою точністю. У 1971 р. XIV ГКМВ затвердила цьому основну одиницю кількості речовини — моль.

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;

кілограм — одиниця маси, що дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма;

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

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 в $2 \cdot 10^{-7}$ Н;

кельвін — одиниця термодинамічної температури і дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води;

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;

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

Крім основних одиниць SI, є велика група **похідних одиниць**, 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} (табл. 1.2).

Таблиця 1.2.

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
$100000000000000000000000 = 10^{18}$	екса	Е	E
$10000000000000000000000 = 10^{15}$	пета	П	P
$1000000000000000000000 = 10^{12}$	тера	Т	T
$10000000000 = 10^9$	гіга	Г	G
$1000000 = 10^6$	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
$0,000000000001 = 10^{-12}$	піко	п	p
$0,0000000000000001 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,0000000000000000001 = 10^{-18}$	ато	а	a
$0,0000000000000000000001 = 10^{-21}$	зепто	з	z
$0,000000000000000000000001 = 10^{-24}$	йокто	й	y

1.3 Структура системи забезпечення єдності вимірювань

Для вирішення головного завдання метрології – забезпечення єдності вимірювань – створено метрологічну систему України.

Метрологічна система України – сукупність законодавчих та інших актів, організаційної структури, наукової, технічної та нормативної бази з метрології, спрямованих на забезпечення єдності вимірювань у державі.

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

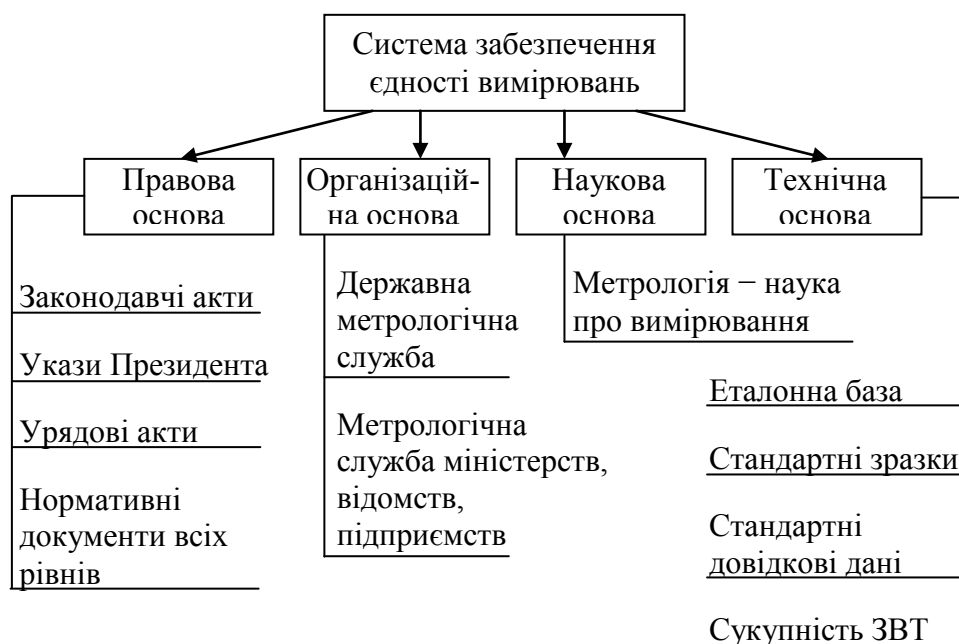


Рис. 1.1. Система забезпечення єдності вимірювань

нормативно-правову, яку складає законодавча метрологія, тобто державні стандарти, технічні регламенти, нормативні документи різного рівня, що встановлюють правила, положення, інші вимоги чи норми, що стосуються метрології та метрологічної діяльності;

організаційну, яка представляє метрологічна служба України, що складається з Державної метрологічної служби і метрологічних служб центральних органів виконавчої влади (міністерств, відомств), підприємств і організацій;

наукову, яку представляє наука про вимірювання, методи та засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення заданої точності вимірювань – **метрологія**;

технічну, яку складають:

еталонна база країни;

робочі засоби вимірювальної техніки;

система стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів;

система стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів;

система державних випробувань, метрологічної атестації, калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).

1.4 Нормативно-правова основа системи ЗЄВ

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

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

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

Загальні правила і норми встановлюються державними стандартами України (ДСТУ).

Стандарти – комплекс нормативно-правових документів, що встановлюють єдину номенклатуру взаємно пов'язаних правил, норм, положень, вимог і норм, які визначають організацію і методику проведення робіт для оцінки та забезпечення єдності вимірювань у країні.

Основними об'єктами стандартизації в галузі метрологічного забезпечення є:

терміни і визначення метрології та вимірювальної техніки [5];

одиниці вимірювань фізичних величин; державні еталони і повірочні схеми; методи і засоби передавання розмірів одиниць вимірювань фізичних величин; методи та засоби атестації, повірки і калібрування ЗВТ;

номенклатура нормованих метрологічних характеристик ЗВТ; норми точності вимірювань; методики виконання вимірювань; способи відображення та форми подання результатів вимірювань і показників точності вимірювань; методи нормування та оцінки показників точності вимірювань і метрологічних характеристик ЗВТ; вимоги до стандартних зразків властивостей та складу речовин і матеріалів;

організація і порядок проведення державних випробувань, метрологічної атестації, повірки і калібрування ЗВТ, метрологічної експертизи нормативно-технічної, проектної, конструкторської та технологічної документації, експертизи і атестації даних про властивості речовин і матеріалів; порядок затвердження типів ЗВТ;

вимоги до метрологічного забезпечення технічних об'єктів та методи оцінки його ефективності.

До ДСТУ, крім основних стандартів, входять також державні стандарти на еталони й державні повірочні схеми, на методики повірки, калібрування й атестації ЗВТ, на норми точності для окремих видів вимірювань і на типові методики виконання вимірювань.

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

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

1.5 Організаційна основа забезпечення єдності вимірювань

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

Державна метрологічна служба організовує, проводить та координує діяльність, спрямовану на забезпечення єдності вимірювань у державі, а також здійснює метрологічний контроль і нагляд за додержанням вимог Закону [1], технічних регламентів із забезпечення єдності вимірювань, інших нормативно-правових актів і нормативних документів з метрології.

До Державної метрологічної служби належать:

спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади у сфері метрології (ЦОВМ) – Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики (Держспоживстандарт);

національний науковий метрологічний центр, що належить до сфери управління ЦОВМ;

державні наукові метрологічні центри, що належать до сфери управління ЦОВМ;

територіальні (регіональні) органи ЦОВМ в Автономній Республіці Крим, областях, містах Києві та Севастополі, містах обласного значення;

державні служби: Державна служба єдиного часу і еталонних частот; Державна служба стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів; Державна служба стандартних довідкових даних про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів.

ЦОВМ здійснює державне управління забезпеченням єдності вимірювань в Україні.

До повноважень ЦОВМ належить проведення єдиної в державі технічної політики щодо забезпечення єдності вимірювань, у тому числі:

організація проведення фундаментальних досліджень у сфері метрології;

організація створення та функціонування еталонної бази України;

встановлення порядку створення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування еталонів, а також звірення їх з еталонами інших держав та міжнародними еталонами;

координація діяльності метрологічної служби України;

розроблення та затвердження нормативно-правових актів у сфері метрології та метрологічної діяльності;

затвердження типів засобів вимірювальної техніки, а також державних стандартних зразків, та встановлення порядку ведення Державного реєстру засобів вимірювальної техніки;

встановлення вимог до розроблення та атестації методик виконання вимірювань та порядку ведення Державного реєстру методик виконання вимірювань, що застосовуються у сфері поширення державного метрологічного нагляду;

організація та проведення державного метрологічного контролю і нагляду; розроблення або участь у розробленні державних наукових і науково-технічних програм, що стосуються забезпечення єдності вимірювань;

представництво та участь України у міжнародних, європейських та інших регіональних організаціях з метрології.

Метрологічні служби центральних органів виконавчої влади, підприємств і організацій можуть створюватися:

у центральних органах виконавчої влади (у тому числі в їх центральних апаратах) – для координації робіт, пов'язаних із забезпеченням єдності вимірювань і здійсненням метрологічного контролю і нагляду;

в органах управління об'єднань підприємств – для виконання делегованих підприємствами, що входять до складу об'єднань, функцій щодо забезпечення єдності вимірювань;

на підприємствах і в організаціях – для забезпечення єдності вимірювань та здійснення метрологічного контролю і нагляду.

Ці служби виконують роботи, пов'язані із забезпеченням єдності вимірювань, основними з яких є:

організація і здійснення метрологічного контролю і нагляду;

розроблення методик виконання вимірювань, методик метрологічної атестації, повірки та калібрування засобів вимірювальної техніки;

організація подання на державні випробування і повірку, а також організація проведення ремонту засобів вимірювальної техніки.

1.6. Наукова основа забезпечення єдності вимірювань

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

теоретичну (фундаментальну) метрологію;

законодавчу метрологію;

практичну (прикладну) метрологію.

Головними завданнями сучасної метрології є [10]:

розвиток загальної теорії вимірювань, систем одиниць вимірювань, теорії точності і методів обробки результатів вимірювань;

подальше підвищення точності відтворення, зберігання і передачі розмірів одиниць вимірювань;

розробка методів оптимізації систем передачі розмірів одиниць від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки;

розширення номенклатури вимірюваних ФВ, частотних і динамічних діапазонів;

розробка і впровадження нових вимірювальних технологій на базі квантових ефектів, цифрової та обчислювальної техніки;

підвищення ефективності та надійності метрологічного забезпечення в країні;

гармонізація вітчизняної і світової метрології в усіх її аспектах.

1.7. Технічна основа системи забезпечення єдності вимірювань

Технічну основу системи ЗЄВ складають:

державні еталони одиниць вимірювань;

система передачі розмірів одиниць від еталонів до робочих ЗВТ;

сукупність усіх ЗВТ у країні з інфраструктурою їх обслуговування;

сукупність стандартних зразків складу та властивості речовин і матеріалів;

стандартні довідкові дані про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів.



Рис. 1.2 . Структура технічної основи системи ЗЄВ

Вище було наведено визначення терміну “єдність вимірювань”. Наведемо ще одне з “Рекомендации по межгосударственной стандартизации” РМГ 29-99 [6], до якого приєдналась Україна (на мові оригіналу): “состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, вос-

производимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы”.

Таким чином, вищим технічним рівнем системи ЗЄВ є державні первинні еталони, а взаємозв'язок елементів технічної основи можна подати схемою (рис. 1.2).

Розглянемо основні елементи цієї системи.

1.7.1 Система державних еталонів

Визначення еталона в усіх міжнародних і вітчизняних документах має близький зміст і в Законі України “Про метрологію та метрологічну діяльність” сформульовано так:

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

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

Перелічені вище основні функції еталона добре збігаються з вимогами до еталонів, сформульованими ще в 30-і роки минулого століття видатним вченим-метрологом М.Ф. Маліковим: «Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя тесно связанными друг с другом существенными признаками: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью».

Відтворення одиниць здійснюється одним із двох способів, що обирається, виходячи з техніко-економічної доцільності: *централізовано* – за допомогою єдиного для всієї країни державного еталона чи *децентралізовано* – коли необхідна точність відтворення може бути забезпечена за допомогою вимірювань, що виконуються в кількох органах метрологічної служби [7].

Централізовано відтворюють усі (окрім моля) основні одиниці Міжнародної системи SI і ряд похідних. Головними критеріями для централізованого відтворення похідних одиниць є: широка поширеність засобів вимірювань, які грабуються за даною одиницею; більша точність відтворення розміру одиниці за допомогою єдиного еталона; технічна можливість передачі розмірів одиниці від еталонів засобам вимірювань нижчої точності за повірочною схемою; недоцільність відтворення одиниць в кількох органах метрологічної служби.

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

У той же час для ряду особливо важливих одиниць потрібно мати кілька первинних еталонів, наприклад, для одиниці напруги – вольт: у світовій практиці створено еталони вольт для напруги постійного струму, кілька еталонів

напруги змінного струму (в різних піддіапазонах частот), а також еталони для високої напруги (сотні кіловольт) постійного і змінного струму.

Нижче ці питання будуть розглянуті більш детально.

1.7.2 Стандартні зразки речовин та матеріалів

У відповідності до [5], **стандартний зразок** – міра у вигляді речовини або матеріалу зі встановленими в результаті метрологічної атестації значеннями однієї або більше величин, що характеризують властивості або склад цієї речовини або матеріалу. Розрізняють стандартні зразки властивості і стандартні зразки складу. Стандартні зразки (СЗ) за метрологічним призначенням можуть використовуватися як робочі еталони і, таким чином, займають важливе місце в системі забезпечення єдності вимірювань. Вони використовуються для градування, повірки або калібрування засобів вимірювання хімічного складу, механічних, оптичних та інших властивостей речовин і матеріалів.

Стандартні зразки використовуються у вигляді речовин (або тіл), одна із властивостей яких служить для відтворення за певних умов одиниці вимірювання, коефіцієнта чи умовної шкали [8, 9].

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

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

СЗ класифікуються за такими ознаками:

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

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

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

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

1.7.3 Сукупність робочих засобів вимірювальної техніки

Засіб вимірювальної техніки, згідно з ДСТУ 2681-94 [5], це технічний засіб, який застосовується під час вимірювання і має нормовані метрологічні характеристики.

Засоби вимірювальної техніки за метрологічним призначенням поділяються на робочі ЗВТ та еталонні.

Робочий ЗВТ – це засіб вимірювальної техніки, що застосовується для вимірювань, не пов'язаних з передаванням розміру одиниці фізичної величини іншим засобом.

Робочі ЗВТ класифікуються за багатьма критеріями та ознаками, які розглядаються у відповідних курсах.

Для забезпечення єдності вимірювань відносно робочих ЗВТ у державі існує система вимог і заходів, яка включає до себе:

- а) загальні метрологічні вимоги до ЗВТ;
- б) метрологічне забезпечення підготовки і здійснення виробництва ЗВТ;
- в) державні випробування ЗВТ;
- г) порядок затвердження типів ЗВТ і випуску їх у світ;
- д) порядок проведення калібрування, повірки та атестації ЗВТ;
- е) загальні вимоги до розробки та атестації методик проведення вимірювань.

1.7.4 Система передачі розміру одиниць

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

Розмір одиниці ФВ передається від державного первинного еталона, який “задає точність”, іншим ЗВТ за допомогою “багатоповерхової” системи, куди входять еталони різного рівня і робочі ЗВТ [8]. Цю систему можна подати у вигляді піраміди (рис. 1.3).

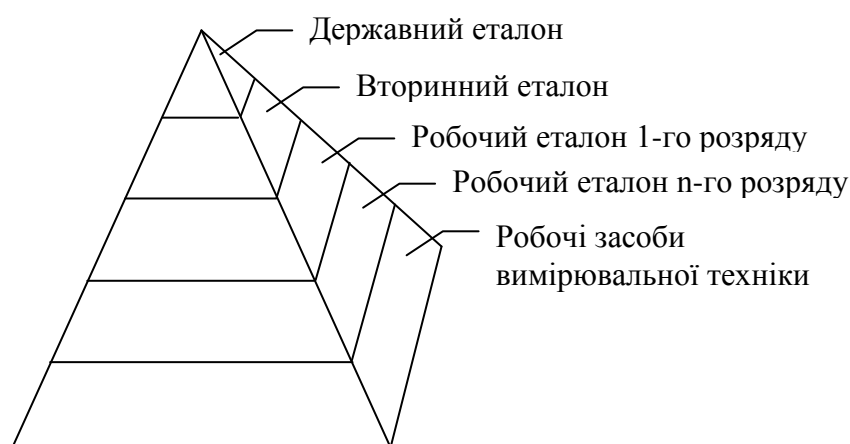


Рис. 1.3. Багатоповерхова система передавання розміру одиниці

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

Наприклад, система передачі розміру одиниці напруги постійного струму – вольт – включає, крім державного еталона, вторинний еталон (близько десяти) і робочі еталони 1-го, 2-го і 3-го розрядів, кількість яких становить кілька тисяч, а кількість робочих ЗВТ – близько мільйона. Нормативний документ, що регламентує метрологічну підпорядкованість ЗВТ, які беруть участь у передаванні розміру одиниці ФВ зі встановленням методу і похибок передавання, носить назву *повірочної схеми*. Завдяки існуванню системи передавання розміру одиниці і повірочної схеми забезпечується *простежуваність вимірювань*, під якою розуміється властивість еталона одиниці вимірювань або результату вимірювань бути пов'язаними з державними первинними еталонами відповідної одиниці шляхом звірення еталонів, повірки, калібрування або атестації ЗВТ.

Більш докладно питання побудови повірочних схем будуть розглянуті в розділі 2.

1.7.5 Стандартні довідкові дані про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів

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

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

Основними завданнями цієї служби є:

забезпечення вичерпною оперативною інформацією про властивості та склад речовин і матеріалів, які використовуються у виробництві; прискорення одержання нових речовин і матеріалів з визначенням їх властивостей та складу; підвищення продуктивності праці науковців та інженерів за рахунок зниження затрат на пошук інформації;

забезпечення відповідного рівня точності значень фізичних констант та довідкових даних;

розвиток міжнародного співробітництва в галузі стандартизації.

Виконання одного із важливих завдань щодо забезпечення науковців і виробників достовірною та оперативною інформацією про властивості речовин та матеріалів можливе лише при використанні потужних електронно-обчислювальних засобів для збору та опрацювання даних на потребу споживача.

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

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

ФС – незалежні фізичні сталі, що є, як правило, характерними коефіцієнтами фундаментальних фізичних теорій. РМГ 29-99 [6] дає таке визначення: **фізична стала** – фізична величина, що має незмінне значення при визначених 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 і залишається незмінним за будь-яких умов. До числа ФФС відносяться швидкість світла у вакуумі c , електрична (ϵ_0) і магнітна (μ_0) сталі, стала Планка h , елементарний заряд електрона e і т.ін. Розрізняють універсальні, електромагнітні, атомні та фізико-хімічні сталі.

У табл. 1.3 наведено значення універсальних і деяких електромагнітних ФФС, погоджені XV Генеральною асамблеєю КОДАТА* в 1986 р [11, 12].

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

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

маси $m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2,2 \cdot 10^{-8}$ кг [13]**.

* КОДАТА – Комітет з чисельних даних для науки і техніки, що знаходиться під юрисдикцією Міжнародної ради наукових товариств. У складі КОДАТА є робоча група з фундаментальних констант.

** У цих виразах $\hbar = h/2\pi$ – стала Дірака.

Значення деяких ФФС

Найменування величини	Позначення	Вихідне рівняння	Значення величини ± абсолютна похибка	Відносна похибка (·10 ⁻⁶)
Універсальні сталі				
Швидкість світла у вакуумі	c	-	299792458 м/с	точно
Магнітна стала	μ_0	-	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = $12,566370614 \cdot 10^{-7}$ Гн/м	точно
Електрична стала	ϵ_0	$(\mu_0 c^2)^{-1}$	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м	точно
Гравітаційна стала	G		$(6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-11}$ м ³ кг ⁻¹ с ⁻²	128
Стала Планка	h		$(6,6260755 \pm 0,0000040) \cdot 10^{-34}$ Дж·с	0,60
Планківська маса	m_p	$(hc/2\pi G)^{1/2}$	$(2,17671 \pm 0,00014) \cdot 10^{-8}$ кг	64
Електромагнітні сталі				
Елементарний заряд	e	-	$(1,60217733 \pm 0,00000049) \cdot 10^{-19}$ Кл	0,30
Квант магнітного потоку	Φ_0	$h/2e$	$(2,06783461 \pm 0,00000061) \cdot 10^{-15}$ Вб	0,30
Стала Джозефсона	$K_{Дж}$	$2e/h$	$(4,8359767 \pm 0,0000014) \cdot 10^{14}$ Гц·В ⁻¹	0,30
Стала Клітцинга	R_K	h/e^2	$25812,8056 \pm 0,0012$ Ом	0,043
Гіромагнітне відношення протона	γ_p	-	$(26752,2128 \pm 0,0081) \cdot 10^4$ с ⁻¹ Тл ⁻¹	0,30

Однак “планківські велечини” знаходяться дуже далеко від використовуваних на практиці діапазонів. Крім того, значення гравітаційної сталої, як і сталої Планка, дотепер відомо з недостатньою точністю. Але найголовнішим недоліком планківських одиниць є те, що вони не відтворюються за допомогою реальних фізичних об'єктів. Саме тому планківські одиниці не використовуються в метрології.

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

Як буде показано нижче, багато первинних еталонів, зокрема, деяких основних і ряду похідних одиниць (саме в області електрики), відтворюють одиниці, розміри яких виражаються через ФФС.

1.8 Забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі

Оглядаючись назад, відзначимо, що вже в XIX столітті різкий підйом світової торгівлі і подальший розвиток науки і техніки привели до усвідомлення необхідності міжнародних угод в метрології. Результатом цього з'явилося підписання в 1875 р. Метричної конвенції, що стала першою офіційною міжнародною угодою, спрямованою на забезпечення єдності одиниць вимірювань і еталонів.

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

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

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

Якщо створення Метричної конвенції здійснювалося зверху, тобто завдяки міжурядовим переговорам, то необхідність у різних домовленостях в області калібрування і випробувань, що сприяють розвитку системи взаємного визнання, виникла в самій економіці. Вперше угода про взаємне визнання сертифікатів про калібрування була укладена між британською і німецькою калібрувальними службами. Із цієї угоди почався усе більш активний рух у цій області, що привів до розробки документа “Угода про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювань, що видаються національними метрологічними інститутами” (CIPM MRA). У жовтні 1999 р. під час XXI Генеральної конференції з мір та ваг 38 країн і 2 міжнародні організації підписали угоду про першу фазу, причому двері до її підписання залишилися відкритими і для інших країн. У жовтні 2003 р. до CIPM MRA приєдналася Україна, і на кінець 2009 р. число учасників цієї угоди становить 59 країн.

Одним з наріжних каменів цієї угоди є так звані “ключові звірення” національних еталонів, для проведення яких створені особливі правила і визначення. Введено також додаткові звірення, що проводяться винятково на регіональному рівні.

Можна сказати, що глобалізація економіки і торгівлі привела до аналогічного явища і в метрології і, зокрема, у створенні і функціонуванні еталонів. Питання збереження еталонів з національної проблеми перетворилися у глобальну. Відбувається деякий зсув центра ваги еталонних робіт з кількісної в якісну сторону – в напрямку участі в міжнародних звіреннях, що вимагає ретельної підготовки, відпрацьовування методик і апаратури еталонів, глибокої експериментальної перевірки всіх метрологічних характеристик еталонів, гармонізації

понять і процедур у даній сфері. Україна – активний учасник цього процесу, багато її еталонів пройшли процедури міжнародних звірень і визнані у світі.

Крім того, Україна є членом ряду міжнародних організацій з метрології, зокрема, Міждержавної ради зі стандартизації, метрології та сертифікації країн СНД, Євро-Азіатської організації державних метрологічних установ (COOMET), Європейської організації національних метрологічних інститутів (EURAMET), активно співпрацює з міжнародними організаціями в рамках Метричної конвенції: Генеральною конференцією з мір та ваг (CGPM), Міжнародним комітетом мір та ваг (CIPM), Міжнародним бюро мір та ваг (BIPM) та іншими організаціями.

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

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

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

Контрольні питання

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

2 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ЕТАЛОНІВ

2.1 Функції еталона

Вище було дано визначення еталона і показано, що він повинен виконувати функції відтворення одиниці фізичної величини, її зберігання і передачі підпорядкованим засобам вимірювальної техніки. Розглянемо ці функції більш докладно.

ДСТУ 2681-94 дає таке визначення терміну “**відтворення одиниці** (фізичної величини)”: відтворення одиниці шляхом формування фіксованої за розміром ФВ відповідно до визначення її одиниці.

Оскільки “розмір ФВ – це кількісний вміст ФВ у даному об’єкті”, то під відтворенням одиниці розуміється як формування відповідної ФВ, так і її кількісне визначення.

Зберігання одиниці – сукупність операцій, що забезпечує незмінність в часі розміру одиниці, що притаманний даному засобу вимірювань.

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

Передавання розміру одиниці, згідно з ДСТУ2681-94, є зведення одиниці ФВ, яка відтворюється або зберігається засобом вимірювання, що повіряється, до розміру одиниці, що відтворюється або зберігається еталоном, яке здійснюється при їх звіренні (повірці або калібруванні). При створенні еталона обов’язково розглядаються питання (методи і засоби) передавання розмірів відтворених ними одиниць підпорядкованим засобам вимірювання, проградуйованих в цих одиницях.

2.2 Класифікація еталонів

За призначенням, функціональними можливостями і метрологічними характеристиками еталони поділяють на первинні, державні, вторинні, вихідні, еталони-копії, робочі, еталони передавання [1, 15].

Первинний еталон – еталон, що забезпечує відтворення одиниці з найвищою в країні (порівняно з іншими еталонами тієї ж одиниці) точністю.

Державний еталон – еталон, визнаний спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади у сфері метрології як основа для встановлення значень усіх еталонів даної одиниці вимірювань, що є у державі.

Вторинний еталон – еталон, що одержує розмір одиниці безпосередньо

від первинного еталона даної одиниці, або, у разі його відсутності, – відповідного еталона іншої країни.

Вихідний еталон – еталон, який має найвищі метрологічні властивості серед еталонів даної одиниці, що є у державі, на підприємстві, в установі чи організації.

Робочий еталон – еталон, призначений для перевірки чи калібрування засобів вимірювальної техніки.

Еталон-копія – вторинний еталон, призначений для передавання розміру одиниці ФВ робочим еталонам. Створюється, як правило, для зниження завантаження первинного еталона та застереження його фізичного зносу.

Еталон передавання (звірення) – вторинний еталон, як правило, транспортбельний (мобільний), призначений для взаємного звірення еталонів, які за якихось обставин не можуть бути звірені безпосередньо.

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

2.3 Особливості еталонів у порівнянні з іншими засобами вимірювальної техніки

Відзначимо, що в метрологічній нормативно-технічній документації звичайно акцентують увагу тільки на відтворенні, зберіганні та передаванні одиниць вимірювань. На практиці навіть для величин, що відповідають основним одиницям SI, еталони, крім одиниць, в окремих випадках зберігають і відтворюють шкали вимірювань (атомного та астрономічного часу, температури тощо). Для таких еталонів використовують поняття **еталон шкали вимірювань, похибка відтворення шкали та похибка передавання шкали**. При будь-якому варіанті побудови еталонів, повірочними схемами передбачається відтворення всіх необхідних для практики ділянок шкал вимірювань [10].

Державні еталони є виключно державною власністю, підлягають затвердженню Держспоживстандартом України і перебувають у його віданні.

Державні (національні) еталони за міжнародною угодою можуть використовуватися як **міжнародні еталони**, що призначаються для погодження (звірення) розмірів одиниць вимірювань, відтворюваних державними (національними) еталонами різних країн.

Еталони можуть бути одиничними і груповими. До складу **групового еталона** входить декілька (група) одиничних еталонів або (та) зразкових засобів вимірювальної техніки одного типу, однакового номінального значення або діапазону вимірювань, що застосовуються сумісно для підвищення точності відтворення одиниці вимірювань або її зберігання.

Всі **еталони підлягають обов'язковому зберіганню**, під яким розуміють сукупність операцій, що необхідні для підтримання метрологічних характеристик еталона в установлених границях. Зберігання еталонів здійснюється під нагля-

дом ученого зберігача, який несе відповідальність за правильне зберігання і використання державного еталона та його вдосконалення.

Еталонна база створюється та вдосконалюється згідно з державними науково-технічними програмами, які розробляються Держспоживстандартом України з метою забезпечення потреб науки, економіки і оборони. За виконання завдань цих програм, технічний рівень державних еталонів та оптимальність структури еталонної бази відповідає Держспоживстандарт України.

На еталони не розповсюджуються ряд ДСТУ та інших нормативних документів щодо нормування метрологічних характеристик (ГОСТ 8.009-72), деякі вимоги до конструкторських, технологічних, експлуатаційних документів тощо. Основні положення про еталони, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування регламентуються окремим ДСТУ 3231:2007, а способи виразу похибок – ГОСТ 8.381-80.

Розглянемо особливості нормування метрологічних характеристик еталонів, зокрема, показників їх точності.

2.4 Нормовані метрологічні характеристики еталонів

Метрологічними характеристиками засобу вимірювальної техніки називаються характеристики, які нормуються для визначення результату вимірювань та його похибок. *Нормованими метрологічними характеристиками* (НМХ) ЗВТ називається сукупність метрологічних характеристик, установлена нормативними документами.

Основними НМХ еталонів є номінальне значення (або діапазон) відтвореної одиниці і характеристики похибки (або невизначеності). Номінальним значенням називається значення величини, приписане еталону при виготовленні. Способи виразу характеристик похибок еталонів встановлює ГОСТ 8.381 –80 [16].

Похибки державних первинних еталонів характеризуються:
невилученою систематичною похибкою (НСП);
випадковою похибкою;
нестабільністю.

Допускається вказувати випадкову похибку відтворення одиниці з урахуванням похибки передачі її розміру або останню вказувати окремо.

В оцінку похибки передачі розміру одиниці мають входити як невилучені систематичні, так і випадкові похибки методу і засобів вимірювань.

Оцінку похибок еталонів слід указувати або в абсолютній формі (в одиницях вимірюваної величини) або у відносній.

Якщо залежність похибки від значення відтвореної величини складніше, ніж лінійна, похибка може бути зазначена у вигляді таблиці за обраними діапазонами (в абсолютній чи відносній формі) або у вигляді функції залежності цієї похибки.

2.4.1 Способи виразу похибок первинного еталона

Оцінку НСП первинного еталона знаходять на підставі експериментальних досліджень еталона, аналізу похибок методу відтворення одиниці та похибок від дії впливаючих величин, а також на підставі міжнародних звірень еталона з еталонами інших країн. Оцінку випадкової похибки первинного еталона знаходять на підставі експериментальних даних, отриманих при дослідженні еталона, і на основі аналізу впливаючих величин. Оцінку нестабільності первинного еталона, викликану впливом старіння його окремих елементів та інших причин, знаходять на підставі досліджень еталона в часі, а також за даними періодичних міжнародних звірень.

НСП первинного еталона, що лежить у межах $\pm \theta$, характеризується границею θ без зазначення знака. Випадкова похибка характеризується середнім квадратичним відхиленням (СКВ) результату вимірювання S при відтворенні одиниці із зазначенням числа n незалежних спостережень. Нестабільність еталона ν слід характеризувати зміною розміру одиниці за визначений проміжок часу. Похибку передачі розміру одиниці характеризують СКВ результату вимірювань $S_{\varepsilon\Sigma}$, обумовленим впливом випадкових і невилучених систематичних похибок методу і засобів вимірювань, застосованих при передачі розміру одиниці.

2.4.2 Способи виразу похибок вторинних еталонів

Похибки вторинних еталонів мають характеризувати відхилення розмірів одиниць, що зберігаються ними, від розміру одиниці, відтвореної за допомогою первинного еталона [16].

Для вторинного еталона вказують сумарну похибку, що включає випадкові похибки звірюваних еталонів і похибки передачі розміру одиниці від первинного еталона, а також нестабільність вторинного еталона. Допускається сумарну похибку вторинного еталона визначати з урахуванням його НСП. Можливо вказувати окремо НСП вторинного еталона, а також його нестабільність. Нестабільність вторинного еталона має визначатися на підставі звірень з первинним еталоном на початку і в кінці періоду, для якого вона визначається.

Сумарна похибка вторинного еталона характеризується СКВ результату вимірювань (S_{Σ}) при його звірненні з первинним еталоном або ж у вигляді довірчої границі похибки $t_{\Sigma}S_{\Sigma}$ з довірчою ймовірністю 0,99.

Якщо НСП і нестабільність вторинного еталона вказують окремо, то їх виражають у вигляді, прийнятому для первинного еталона.

2.5 Обчислення характеристик похибок еталонів

Довірчу ймовірність p при визначенні довірчих границь похибки первинного еталона (як для випадкової, так і для невилученої систематичної) приймають зазвичай рівною 0,99.

Границю НСП еталона θ обчислюють за формулою [16, 17]:

$$\theta = \begin{cases} \pm \sum_{i=1}^N |\theta_i|, & \text{при } N \leq 3; \\ \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}, & \text{при } N \geq 4, \end{cases} \quad (2.1)$$

де θ_i – границя i -ї складової НСП еталона*; $K = 1,4$ при $p = 0,99$ і $k = 1,1$ при $p = 0,95$.

СКВ результату **прямих вимірювань** із багаторазовими спостереженнями S виражають за формулою

$$S = S_i / \sqrt{n}, \quad (2.2)$$

де S_i – СКВ результату **спостережень**, що обчислюється за формулою

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

де X_i – результат i -го спостереження; \bar{X} – результат вимірювань, обчислений як середнє арифметичне результатів спостережень**.

СКВ результатів **непрямих вимірювань** величини X , що є функцією

$$X = F(Y_1, Y_2, \dots, Y_m) \quad (2.4)$$

обчислюють за формулою

$$S = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial F}{\partial Y_k} \right)^2 S_k^2}, \quad (2.5)$$

де S_k – СКВ результату вимірювань величини Y_k , $k = 1, 2, \dots, m \dots$

Границю НСП при **непрямому вимірюванні** в залежності від кількості складових N обчислюють за формулою (2.1), в якій

$$\theta_i = \frac{\partial F}{\partial Y_i} \Delta Y_i, \quad (2.6)$$

де ΔY_i – границя НСП вимірювання величини Y_i .

СКВ суми невилучених систематичних і випадкових похибок S_Σ обчислюють за формулою

* При виводі формули (2.1) зроблене припущення про рівномірний закон розподілу складових невилученої систематичної похибки в середині границь $\pm \theta_i$.

** При багаторазових спостереженнях повинна бути забезпечена практична незалежність окремих спостережень

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + S_{\theta}^2}, \quad (2.7)$$

де $S_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^N \theta_i^2}$ – СКВ суми НСП.

При визначенні довірчої границі похибки $t_{\Sigma} S_{\Sigma}$ вторинного еталона коефіцієнт t_{Σ} обчислюють за формулою

$$t_{\Sigma} = \frac{\theta + t_X S}{S_{\theta} + S}, \quad (2.8)$$

де t_X – коефіцієнт для знаходження довірчих границь похибки результату вимірювань.*

Похибка передачі розміру одиниці складається із суми випадкових і невилучених систематичних похибок методу і засобів вимірювань, які застосовані для передачі розміру одиниці. Оцінку суми невиключених систематичних і випадкових похибок указують у виді СКВ $S_{\varepsilon\Sigma}$, що обчислюють за формулою

$$S_{\varepsilon\Sigma} = \sqrt{S_{\varepsilon}^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N \theta_{\varepsilon_i}^2} \quad (2.9)$$

де S_{ε} – СКВ випадкової похибки методу і засобу передачі розміру; $\frac{\theta_{\varepsilon_i}}{\sqrt{3}}$ – СКВ НСП методу і засобу передачі розміру одиниці.

2.6 Обчислення характеристик невизначеностей еталонів

У міжнародній практиці метрологічні характеристики еталонів прийнято оцінювати в термінах невизначеності [18, 19].

Під **невизначеністю вимірювань** розуміють параметр, пов'язаний з результатом вимірювань, який характеризує розсіювання значень, які можна приписати вимірюваній величині.

Основним кількісним виразом невизначеності вимірювань є **стандартна невизначеність**, яка виражається у вигляді середньоквадратичного відхилення. Якщо результат вимірювань визначають через значення інших величин, то основним кількісним виразом невизначеності вимірювань є **сумарна стандартна невизначеність** u_c . Сумарна стандартна невизначеність складається з часткових стандартних невизначеностей, які за способом їх оцінювання поділяються на невизначеності, які обчислюються за типом *A*, та на невизначеності, які обчислюються за типом *B*. Обчислення за типом *A* здійснюється шляхом статистичного аналізу результатів багаторазових вимірювань. Обчислення за типом *B*

* Оскільки за результат вимірювань приймають середнє арифметичне n спостережень, припускаючи нормальний закон їх розподілу, довірчий коефіцієнт береться з таблиці розподілу Ст'юдента, а при кількості спостережень понад 20-30 – з таблиці для нормального розподілу, що для імовірності 0,99 становить значення 2,58.

роблять без використання статистичного аналізу результатів багаторазових вимірювань. Вихідними даними для обчислення є дані, що базуються на досвіді дослідника або загальних знаннях про поведінку і властивості відповідних приладів і вузлів; невизначеності констант і довідкових даних; дані повірки, калібрування тощо.

У необхідних випадках обчислюють *розширену невизначеність* U за формулою

$$U = k \cdot u_c, \quad (2.10)$$

де k – *коефіцієнт покриття**.

Оцінку y вимірюваної величини Y обчислюють як функцію оцінок x_1, \dots, x_m *вхідних величин*** X_1, \dots, X_m після внесення поправок на всі відомі джерела невизначеності, що мають систематичний характер:

$$y = f(x_1, \dots, x_m), \quad (2.11)$$

де m – число вхідних величин; f – вид функціональної залежності.

Порядок обчислення характеристик невизначеності вимірювання таких.

А. Обчислюють сумарну стандартну невизначеність за типом А (u_A).

Вихідними даними для обчислення є результати багаторазових спостережень: x_{i1}, \dots, x_{in_i} ($i = 1, \dots, m$), де n_i – кількість спостережень i -ї вхідної величини.

А.1. Знаходять стандартну невизначеність одиничного спостереження i -ї вхідної величини:

$$u_{A,i} = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i - 1}}, \quad (2.12)$$

де $\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$ – середнє арифметичне результатів вимірювань i -ї вхідної величини.

А.2. Знаходять стандартну невизначеність вимірювання i -ї вхідної величини, при якій результат визначають як середнє арифметичне за формулою

$$u_A(x_i) = \frac{u_{A,i}}{\sqrt{n_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}. \quad (2.13)$$

Б. Обчислюють стандартну невизначеність за типом В (u_B).

Б.1. Знаходять стандартну невизначеність за типом В для i -ї вхідної величини:

* *Коефіцієнт покриття* – числовий коефіцієнт, що використовується як множник сумарної стандартної невизначеності для отримання розширеної невизначеності

** Вхідні величини – безпосередньо вимірювані або інші величини, що впливають на результат вимірювання.

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}}, \quad (2.14)$$

де b_{i+} , b_{i-} – відповідно верхня і нижня границі можливих значень i -ї величини в припущенні рівномірного закону їхнього розподілу*.

Для симетричних границь ($\pm b_i$)

$$u_B(x_i) = \frac{b_i}{\sqrt{3}}. \quad (2.15)$$

В. Обчислюють коефіцієнт кореляції між парами вхідних величин, для чого використовують погоджені пари вимірювань (x_{il}, x_{jl}) ($l = 1, \dots, n_{ij}$, де n_{ij} – кількість погоджених пар результатів вимірювань):

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{il} - \bar{x}_i)(x_{jl} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{il} - \bar{x}_i)^2 \sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{jl} - \bar{x}_j)^2}}. \quad (2.16)$$

Г. Обчислюють сумарну стандартну невизначеність (u_c).

Г.1. У випадку некорельованих оцінок x_1, \dots, x_m сумарну стандартну невизначеність обчислюють за формулою

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i), \quad (2.17)$$

де $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ – коефіцієнт чутливості; $c_i u(x_i) = u_i(y)$ – вклад невизначеності i -ї вхідної величини до невизначеності вимірюваної величини y .

Г.2. У випадку корельованих оцінок x_1, \dots, x_m сумарну стандартну невизначеність обчислюють за формулою

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j=1}^{i-1} r(x_i, x_j) c_i c_j u(x_i) u(x_j), \quad (2.18)$$

де $r(x_i, x_j)$ – коефіцієнт кореляції; $u(x_i)$ – стандартна невизначеність i -ї вхідної величини, обчислена за типом А чи В.

Д. За необхідності обчислюють розширену невизначеність за формулою (2.10). У загальному випадку коефіцієнт охоплення вибирають відповідно до формули**

* У випадку інших законів розподілу формули для обчислення невизначеності за типом В будуть іншими.

** У багатьох практичних випадках при обчисленні розширеної невизначеності роблять припущення про нормальний закон розподілу і вважають $k=2$ при $p=0,95$ і $k=3$ при $p=0,99$.

$$k = t_p(v_{eff}), \quad (2.19)$$

де $t_p(v_{eff})$ – квантиль розподілу Ст'юдента з ефективним числом ступенів свободи v_{eff} і довірчою ймовірністю (рівнем довіри) p .

Число ступенів свободи визначають за формулою

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(x_i)}{v_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4}, \quad (2.20)$$

де v_i – число ступенів свободи при визначенні оцінки i -ї вхідної величини: $v_i = n_i - 1$ – для невизначеності за типом А; $v_i = \infty$ – для невизначеності за типом В.

Для прямих багаторазових вимірювань ця формула має спрощений вигляд

$$v_{eff} = (n-1) \left(\frac{u_c}{u_A} \right)^4. \quad (2.21)$$

2.7 Взаємне перерахування характеристик похибок і невизначеності вимірювань

2.7.1 Перерахування від характеристик похибки до оцінок невизначеності вимірювань

Вхідними даними для розрахунку невизначеності є

- оцінка СКВ S результату вимірювань;
- оцінка НСП у вигляді границь $\theta(p)$ для заданої довірчої ймовірності p ;
- кількість складових НСП N .
- кількість результатів спостережень n , взятих для обчислення середнього арифметичного як оцінку результату вимірювання.

Використовуючи ці вихідні дані, одержуємо:

- оцінку стандартної невизначеності за типом А $\hat{u}_A = S$;

- оцінку стандартної невизначеності за типом В $\hat{u}_B = \frac{\theta(p)}{K(p)\sqrt{3}}$, де коефіцієнт $K(p) = 1,1$ для $p = 0,95$; $K(p) = 1,4$ для $p = 0,99$ і $m > 4^*$;

- оцінку сумарної невизначеності $\hat{u}_c = \sqrt{\hat{u}_A^2 + \hat{u}_B^2}$;

- оцінку ефективного числа ступенів свободи** $\hat{v}_{eff} = (n-1) \left[\frac{\hat{u}_c}{\hat{u}_A} \right]^4$;

* При невиконанні цієї нерівності слід знаходити коефіцієнт $K(p)$ як довірчий коефіцієнт з композиції рівномірних законів розподілу, що складають НСП

** При обчисленні числа ступенів свободи отримане дрібне значення округляється до найближчого меншого цілого числа

- оцінку коефіцієнта покриття k як коефіцієнта Ст'юдента $t_p(v_{eff})$ для заданої ймовірності p й отриманої оцінки числа ступенів свободи \hat{v}_{eff} ;
- оцінку розширеної невизначеності $\hat{U}_p = k\hat{u}_c$.

2.7.2 Перерахування від невизначеності до оцінок характеристик похибок вимірювань [20]

Вхідними даними при поданні невизначеності для розрахунку оцінок характеристик похибки є:

- розширена невизначеність U ;
- коефіцієнт покриття k ;
- рівень довіри p .
- кількість результатів спостережень n .

У цьому випадку можна одержати:

- оцінку СКВ, що характеризує сумарну похибку $\hat{S}_\Sigma = \frac{U_p}{k} = u_c$;

- оцінку ефективного числа ступенів свободи \hat{v}_{eff} – з таблиці розподілення Ст'юдента за заданим коефіцієнтом покриття для довірчої ймовірності 0,95; .

- оцінку СКВ випадкової похибки результату вимірювань $\hat{S} = u_A = \hat{S}_\Sigma \cdot \sqrt[4]{(n-1)/\hat{v}_{eff}}$;

- оцінку СКВ, що характеризує НСП $\hat{S}_\theta = u_B = \sqrt{\hat{S}_\Sigma^2 - \hat{S}^2}$;

- оцінку довірчих границь НСП $\hat{\theta}(p) = K_p \sqrt{3} \hat{S}_\theta$, де коефіцієнт $K(p) = 1,1$ для $p = 0,95$; $K(p) = 1,4$ для $p = 0,99$ і $m > 4$.

- оцінку довірчих границь похибки $\hat{\Delta}_p = \frac{t_p(n-1)\hat{S} + \hat{\theta}(p)}{\hat{S} + \hat{S}_\theta} \hat{S}_\Sigma$, де $t_p(n-1)$ – коефіцієнт Ст'юдента для заданої ймовірності p і числа ступенів свободи $(n-1)$.

2.8 Передача розмірів одиниць ФВ від еталонів робочим засобам вимірювальної техніки

2.8.1 Повірочні схеми

Однією з функцій еталона є передача розміру одиниці ФВ робочим ЗВТ.

Для передачі розмірів одиниць від первинного еталона великому парку робочих ЗВТ доводиться використовувати багатоступеневу процедуру, схема якої наведена на рис. 2.1.

Передача розмірів одиниць робочим ЗВТ здійснюється за допомогою робочих еталонів (РЕ). У залежності від точності РЕ підрозділяють на розряди. РЕ знаходяться в метрологічних інститутах або лабораторіях державної чи відомчої метрологічної служби.

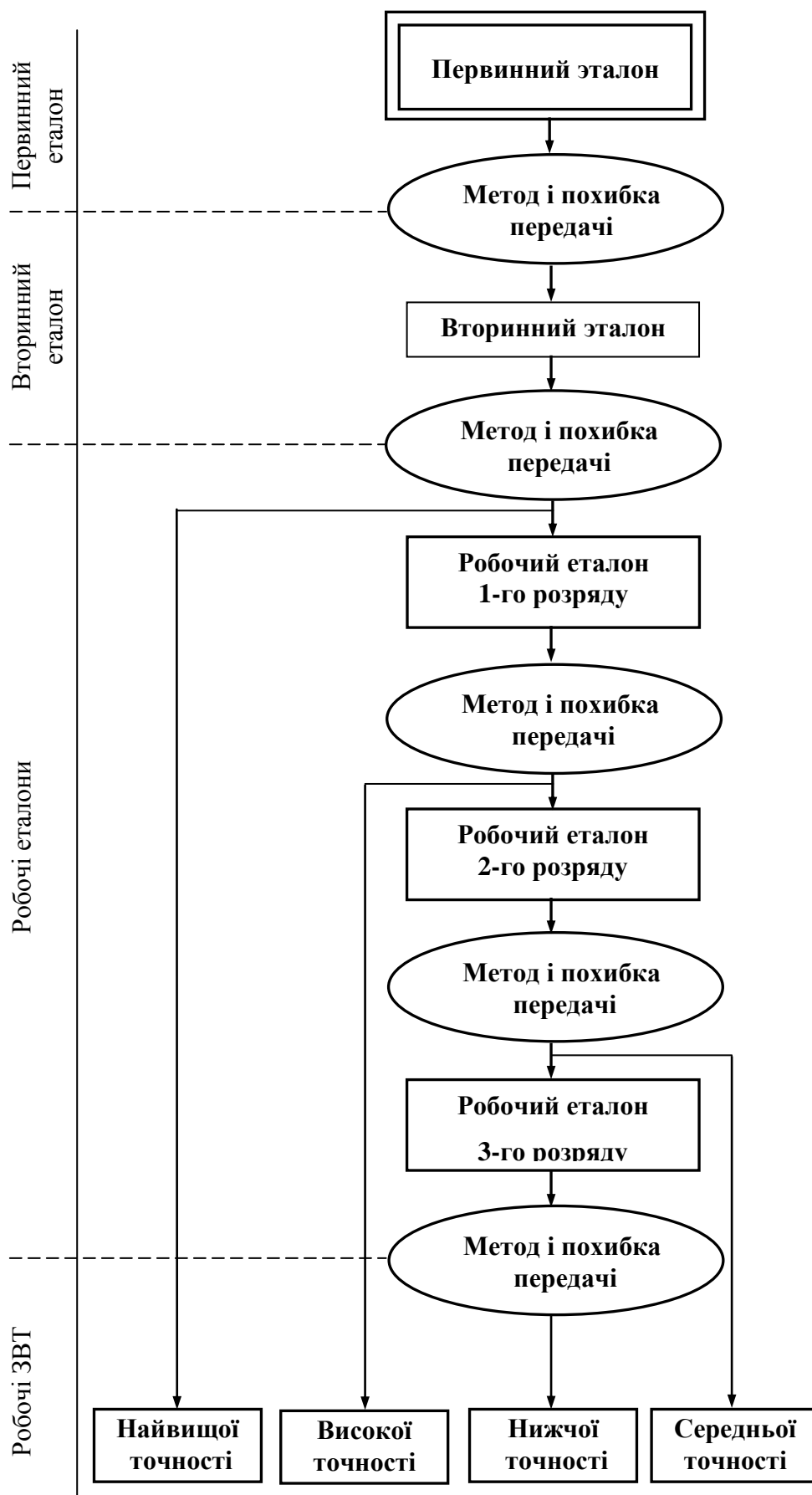


Рис. 2.1. Схема багатоступеневої процедури передачі розміру одиниці від еталона до робочих ЗВТ

Для забезпечення правильної передачі інформації про розмір одиниць ФВ у всіх ланках метрологічної ієрархії повинен бути встановлений порядок. Цей порядок наводиться в повірочній схемі.

Повірочна схема – нормативний документ, що встановлює підпорядкованість ЗВТ, які беруть участь у передаванні розміру одиниці ФВ від державного або вихідного еталона робочим ЗВТ зі встановленням методів і похибок передавання.

У залежності від області поширення повірочні схеми поділяються на державні і локальні.

Державна повірочна схема поширюється на всі ЗВТ даної ФВ, що існують у країні.

Локальна повірочна схема поширюється на ЗВТ даної ФВ, що застосовуються в регіоні, галузі, відомстві або на окремому підприємстві (в організації).

Повірочні схеми складаються з текстової частини і креслення. На кресленні вказуються:

- найменування ЗВТ;
- діапазон значення ФВ;
- похибки ЗВТ;
- метод та похибки передачі розміру одиниці.

Найменування еталонів і робочих ЗВТ указуються в прямокутниках, причому прямокутник з первинним еталоном позначають подвійною лінією.

Найменування методів передачі розмірів одиниць поміщають у горизонтальні овали між найменуваннями робочого ЗВТ, що повіряється, і відповідного РЕ. Похибка методу перевірки вказується в тому самому овалі. Інші питання побудови й оформлення повірочних схем наведено в ГОСТ 8.061-80.

Відзначимо, що число ступенів повірочної схеми і, відповідно число розрядів робочих еталонів для різних областей вимірювань і видів фізичних величин можуть бути різними і залежать від кількості, видів, рівня точності засобів вимірювань і інших факторів. Крім того, як робочі еталони того самого розряду можуть застосовуватися різні засоби – все залежить від особливостей конкретної області вимірювань.

2.8.2 Методи вимірювань, що застосовуються при передаванні одиниці

Усі засоби вимірювальної техніки, що використовуються у передаванні розміру одиниці, можливо класифікувати за такими ознаками [5, 10]:

1) за призначенням:

міри – ЗВТ, що відтворюють та (або) зберігають фізичну величину з певним значенням;

вимірювальні прилади (ВП) – ЗВТ, в яких створюється вихідний сигнал, що несе інформацію про значення вимірюваної фізичної величини;

засоби порівняння – технічні пристрої або спеціально створене середовище, за допомогою яких можливо виконувати порівняння мір однорідних величин або показань вимірювальних приладів.

2) за метрологічною супідрядністю ЗВТ 1-го та 2-го видів розподіляються

на:

еталонні;
підпорядковані.

При передаванні розміру одиниці використовуються такі методи вимірювань:

метод прямих вимірювань;
звірення підпорядкованого й еталонного ЗВТ одного типу за допомогою засобу порівняння;

метод непрямих вимірювань.

Таким чином, при передаванні розміру одиниці застосовуються такі методи вимірювань.

При передаванні розміру одиниці до ВП:

пряме вимірювання підпорядкованим ВП величини, що відтворюється еталонною мірою.

звірення підпорядкованого й еталонного ВП за допомогою засобу порівняння.

непряме відтворення декількома еталонними мірами величини, яка вимірюється підпорядкованим ВП.

При передаванні розміру одиниці до мір:

пряме вимірювання еталонним ВП величини, що відтворюється підпорядкованою мірою.

звірення значень, відтворених підпорядкованою та еталонною мірами, за допомогою компаратора.

непряме вимірювання величини, яка відтворюється підпорядкованою мірою.

Контрольні питання

1. Дайте визначення первинного еталона.
2. Якими функціями повинен володіти еталон?
3. Що таке відтворення одиниці вимірювань?
4. Якими показниками точності характеризують первинний еталон?
5. Що таке похибка вимірювань?
6. Систематична і випадкова похибка, їх відмінність.
7. Що таке “довірча границя” і “середньоквадратичне відхилення”?
8. Яким параметром характеризується невилучена систематична похибка еталона?
9. Яким параметром характеризується випадкова похибка еталона?
10. Що таке закон розподілу випадкової похибки? Який закон розподілу найбільш поширений на практиці?
11. Що таке невизначеність вимірювання?
12. Чим відрізняється невизначеність типу А і типу В?
13. Що таке стандартна, сумарна і розширена невизначеність?
14. Що таке повірочна схема?
15. Які методи використовуються при передаванні розміру одиниці?

3 ЕТАЛОНИ ОСНОВНИХ ОДИНИЦЬ SI

У даному розділі дається стислий опис історії створення та принципів побудови первинних еталонів основних одиниць SI.

3.1 Секунда

Відзначимо, що пошуки найкращого еталона часу, що відповідає вимогам необхідної точності, відтворюваності і доступності, мають велику історію. Ще в стародавності відлік часу ґрунтувався на періоді обертання Землі навколо своєї осі. Донедавна секунду визначали як $1/86400$ частину середньої сонячної доби, тобто еталонем часу була “Земля, що обертається навколо своєї осі”. Пізніше було виявлено, що обертання Землі навколо своєї осі відбувається нерівномірно. Відносна похибка відтворення одиниці часу відповідно до цього визначення становила близько 10^{-7} , що було недостатньо для ряду практичних застосувань і наукових досліджень. Тому в основу визначення одиниці часу поклали період обертання Землі навколо Сонця – тропічний рік (тобто інтервал між двома весняними рівноденнями). Розмір секунди був визначений як $1/31556925,9744$ частина тропічного року. Оскільки тропічний рік також змінюється (близько 5 с за 1000 років), то за основу був узятий тропічний рік, віднесений до 12 год. ефемеридного часу (рівномірний поточний час, що визначається астрономічним шляхом) 0 січня 1900 року, що відповідає 12 годині 31 грудня 1899 р. Це визначення секунди було зафіксовано в Міжнародній системі одиниць 1960 р. Дане рішення дозволило на 3 порядки (у 1000 разів) знизити похибку визначення одиниці часу, а еталонем часу стала “Земля, що обертається навколо Сонця” [22].

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

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

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

Першим кроком у цьому напрямку було використання електромагнітного випромінювання молекул і створення молекулярних аміачних годинників

(1953, Г. Люкс), нестабільність ходу яких становила близько $1 \cdot 10^{-7}$. Усі подальші зусилля не дозволили знизити нестабільність менше за $1 \cdot 10^{-8}$, але була встановлена причина, що обмежує можливості молекулярного генератора – хаотичний тепловий рух часток газу (так званий подовжній ефект Допплера). Подальші дослідження дозволили значною мірою подолати вплив цього ефекту.

На початку 60-х р. група вчених з NBS, США (нині NIST*) створила квантовий генератор на основі цезію, в якому вдалося майже цілком уникнути подовжнього ефекту Допплера. У перших моделях цезієвого генератора нестабільність становила близько $1 \cdot 10^{-9}$, але надалі її вдалося істотно знизити. Кращі сучасні цезієві генератори (стандарти частоти) мають нестабільність на рівні 10^{-14} при відтворюваності частоти порядку $5 \cdot 10^{-14}$.

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

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

Відповідно до визначення одиниці часу, її відтворення здійснюється цезієвим репером (рис. 3.1). Суть роботи репера полягає в стабілізації частоти кварцового генератора за частотою випромінювання атомів цезію. Основою еталона є атомно-променева трубка. Атоми цезію-133 випромінюються нагрітим до температури 100-150 °С джерелом 1 (цезієва піч). Пучок цих атомів потрапляє до області неоднорідного магнітного поля, створюваного магнітом 2. Кут відхилення атомів у такому магнітному полі визначається їхнім магнітним моментом. Тому неоднорідне магнітне поле дозволяє виділити з пучка ті атоми, що знаходяться на визначеному енергетичному рівні. Ці атоми спрямовуються в об'ємний резонатор 3, пролітаючи через який взаємодіють із змінним електромагнітним полем надвисоких частот (НВЧ). Частота електромагнітних коливань може регулюватися в невеликих межах.

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

* NIST – національний інститут стандартів і технологій США.

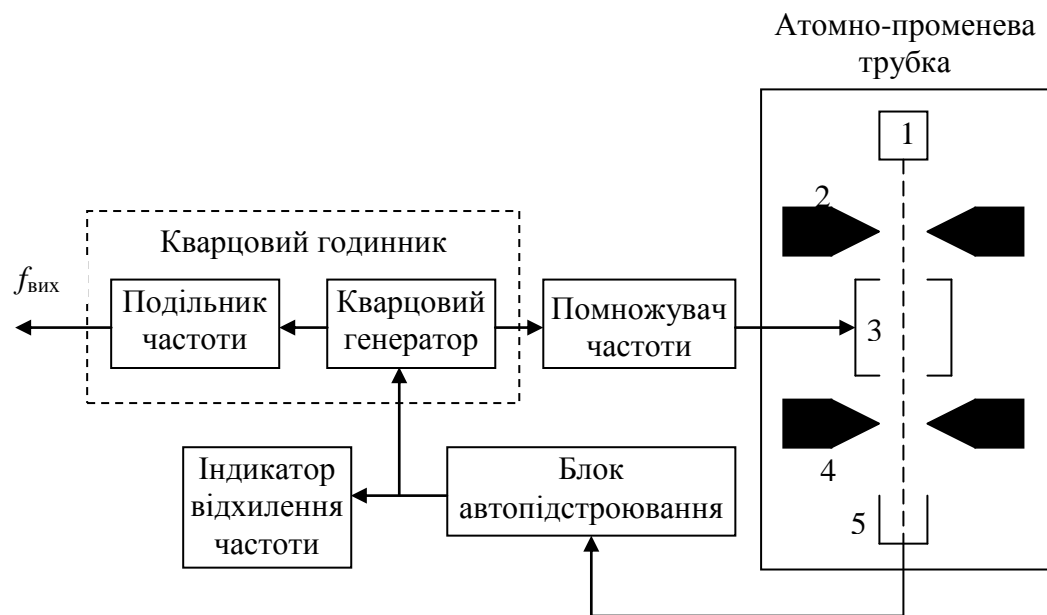


Рис. 3.1. Структурна схема цезієвого репера: 1 – джерело атомів цезію-133; 2, 4 – магніти; 3 – резонатор; 5 – детектор

Системи з використанням атомно-променевої трубки на цезії, як правило, будуються за пасивною схемою, коли кварцовий стандарт частоти (КСЧ) відіграє роль квантового дискримінатора, тобто енергія НВЧ коливань поглинається атомами цезію (рис. 3.1).



Рис. 3.2. Цезієвий репер частоти (ВНИИФТРИ)

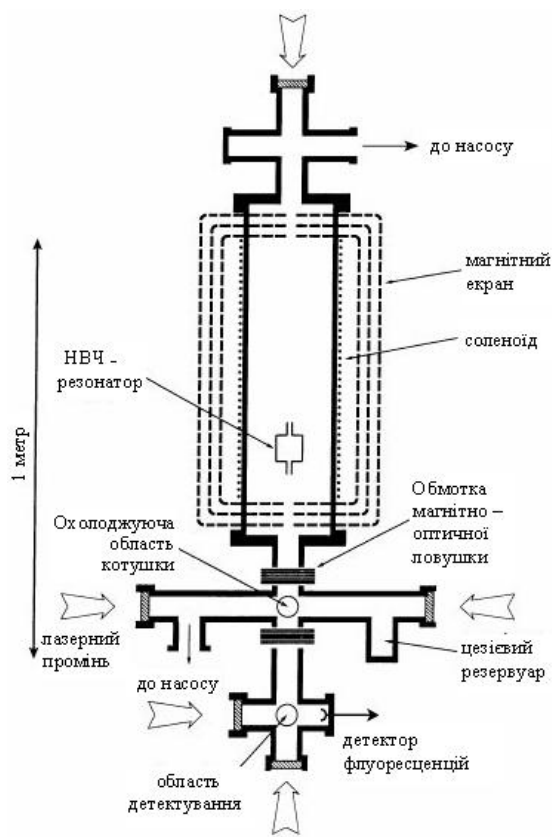
При відхиленні частоти кварцового генератора від номінального значення інтенсивність переходів атомів і, отже, щільність атомного пучка на виході трубки різко зменшується. Блок автопідстроювання, зв'язаний з трубкою, ви-

робляє сигнал помилки, що повертає частоту кварцового генератора до номінального значення. Подільник частоти, що знаходиться в кварцовому годиннику, дозволяє одержати на їхньому виході необхідні частоти і часові інтервали (у тому числі і частоту 1 Гц).

Відтворення одиниць часу і частоти за допомогою метрологічного цезієвого репера класичного пучкового типу здійснюється з НСП близько $(3-5) \cdot 10^{-14}$ (рис. 3.2).

Відзначимо, що в останні роки створено цезієвий репер нової конструкції, що одержав назву “цезієвого фонтана” і вже працює нині в еталонах Англії, Німеччини і США (рис. 3.3).

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



а
б
Рис. 3.3. Цезієвий фонтан NPL*: а – структурна схема;
б – зовнішній вигляд

Як уже було сказано, роль основного зберігача одиниць часу і частоти віді-

* NPL – Національна фізична лабораторія Англії

грає водневий генератор. Стисло розглянемо принцип його роботи (рис. 3.4). 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 проходить просторове сортування (сепарацію). У результаті останньої на вхід накопичувального осередку 4, розташованого в об'ємному резонаторі 5, потрапляють лише атоми водню, що знаходяться на потрібному енергетичному рівні. Високодобротний резонатор, що знаходиться усередині багатосарового 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 1420405751,8 Гц. Це викликає самозбудження генератора, частота якого відзначається високою стабільністю.

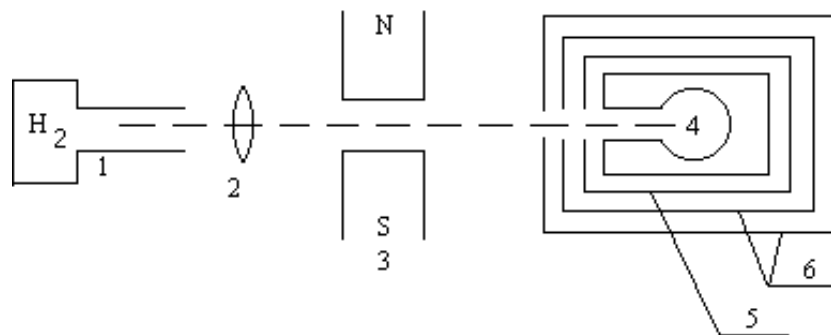


Рис. 3.4. Структурна схема водневого генератора: 1 – балон з воднем; 2 – коліматор; 3 – осевий магніт; 4 – накопичувальний осередок; 5 – резонатор; 6 – багатосаровий екран

Водневий стандарт частоти зазвичай є активним пристроєм, тобто відіграє роль квантового генератора, за частотою якого через систему синтезу частот і фазового автопідстроювання частоти стабілізується частота кварцового генератора (рис. 3.5, 3.6) [23].

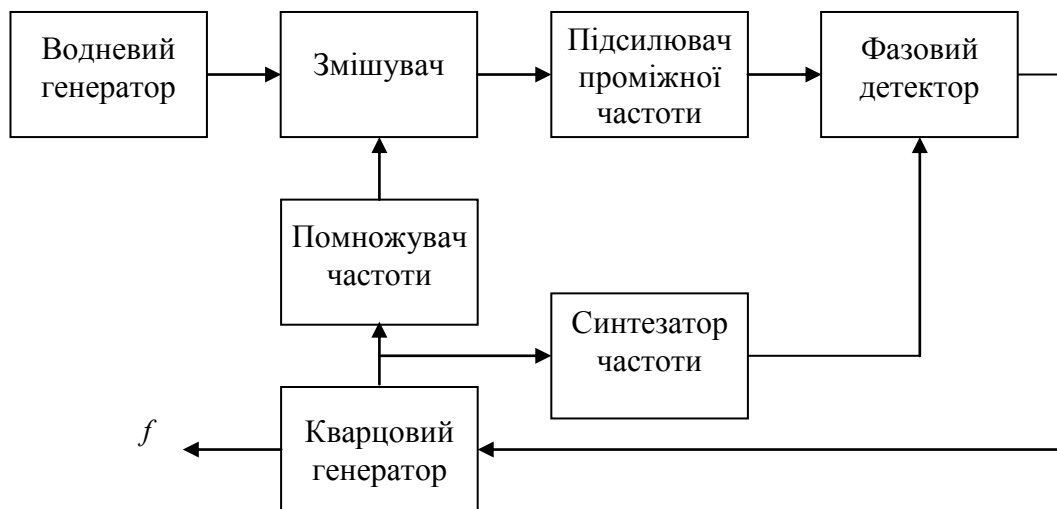


Рис. 3.5. Структурна схема водневого стандарту частоти



Рис. 3.6. Зовнішній вигляд водневих стандартів частоти

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

- апаратура відтворення і збереження одиниць часу і частоти, основними елементами якої є цезієвий репер і водневі стандарти частоти;
- апаратура формування і збереження шкал атомного і координованого часу;
- система внутрішніх звірень для проведення взаємних звірень частот і сигналів часу різних зберігачів і проведення їхнього коригування (фазові і частотні компаратори, вимірювачі характеристик сигналів тощо);
- система зовнішніх звірень, що забезпечує передачу розмірів одиниць і шкали часу вторинному і робочому еталонам, а також звірення національної шкали зі шкалами часу інших країн. Це можуть бути спеціальні навігаційні системи, телевізійна апаратура, радіометеорна система, апаратура фазових звірень, 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 (рис. 3.7). Це важливо для багатьох областей науки і техніки, зокрема, для створення єдиного еталона часу-частоти-довжини, про що буде сказано нижче.

Наведемо метрологічні характеристики державного еталона часу і частоти України [24]:

- 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 $5 \cdot 10^{-14}$;
- НСП відтворення – не більше $1 \cdot 10^{-13}$.

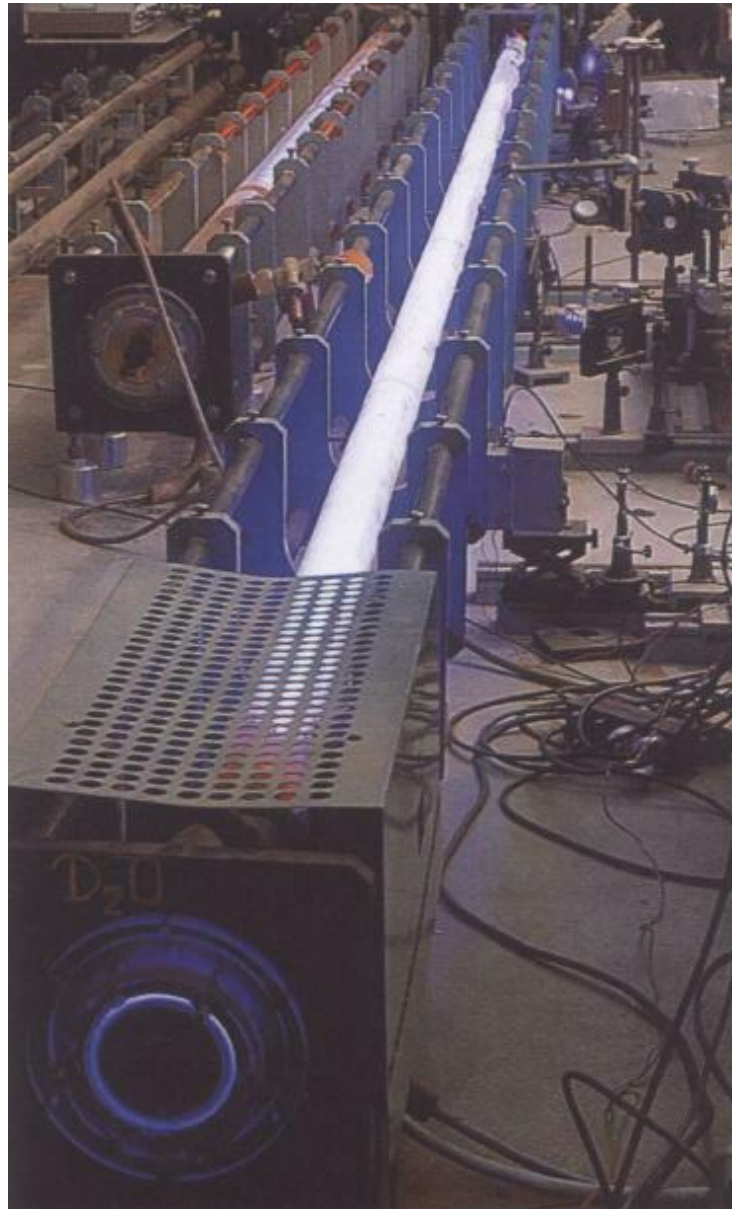


Рис. 3.7. Радіооптичний частотний міст

Еталон України активно співпрацює з еталонами інших країн, зокрема Росії.

3.2 Метр

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 (триангуляцій) частини дуги меридіана від Дюнкерка до Барселони експедиціями вчених на чолі з Мешеном і Делабром* був виготовлений еталон метра у

* Р.-Ф. Mechain, J.-В. Joseph Delambre

вигляді платинової кінцевої міри, переданої на збереження в національний Архів Франції. Цей еталон отримав назву “метра Архіву”. Метр Архіву являє собою платинову лінійку шириною близько 25 мм, товщиною близько 4 мм із відстанню між кінцями, що дорівнює 1 м (рис. 3.8, а).

Повторні вимірювання довжини дуги меридіана, виконані в ХІХ ст., довели, що довжина прийнятого метра дещо коротше справжнього “природного” метра. Оскільки надалі, при більш точних вимірюваннях, можливо було б одержати різні значення основної одиниці довжини, Міжнародна комісія з прототипів метричної системи, 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 °С рівним метру Архіву і був прийнятий як міжнародний прототип метра. Інші 30 еталонів були розподілені між різними державами.

Еталон метра являв собою платино-іридієвий брусок довжиною 102 см, що має в поперечному перерізі форму Х (рис. 3.8 б).

Платино-іридієвий еталон метра номер 28, отриманий Росією в 1889 р., був у подальшому затверджений як державний еталон. Одиниця довжини – метр визначається відстанню між осями двох середніх штрихів, нанесених на бруску, при 0 °С. Хоча еталон був виготовлений зі сплаву іридію і платини, що відрізняється значною твердістю і стійкістю до окислювання, не було повної впевненості в тому, що довжина еталона з часом не зміниться. Це пояснюється тим, що металеві стрижні, які піддалися раніше термічній і механічній обробці, 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 приводить до похибки звірення на рівні 10^{-7} м.



а



б

Рис. 3.8. Платинова кінцева міра довжини (метр Архіву) (а) і платино-іридієвий штриховий еталон метра (б), що зберігаються в Архіві Франції

Тому необхідно було ввести новий природний еталон метра. У 1895 р. II Генеральна конференція з мір та ваг визнала, що природним носієм розміру метра може бути довжина хвилі монохроматичного світла. Після вивчення спектральних ліній ряду елементів було знайдено, що найбільшу точність відтворення одиниці довжини забезпечує оранжева лінія ізотопу криптону-86. XI Генеральна конференція з мір та ваг (1960 р.) прийняла визначення розміру метра в такому вигляді: “Метр – довжина, що дорівнює 1 650 763,73 довжин хвиль у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптону-86”. Як відомо, квант світлової енергії випромінюється або поглинається атомом при переході з одного енергетичного стану в інший. Частота випромінювання (поглинання) пропорційна різниці енергій станів:

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

де E_1 і E_2 – рівні енергій; h – стала Планка.

Якщо $E_2 > E_1$, відбувається випромінювання електромагнітних хвиль, якщо $E_2 < E_1$ – поглинання. При поширенні випромінювання у вакуумі зі швидкістю c , довжина хвилі монохроматичного світла дорівнює

$$\lambda = \frac{ch}{E_2 - E_1}.$$

При дослідженні спектрів різних речовин було виявлено, що елементи з парним номером у таблиці Менделєєва і парною атомною масою (т.зв. 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. Схему лампи з криптоном наведено на рис. 3.9.

З метою одержання необхідних умов для випромінювання лінії криптон укладають у капіляр і охолоджують рідким азотом до 50 – 60 К. Атоми криптону збуджують шляхом пропускання через нього електричного струму (напруга порядку 1500 В). При цьому капіляр, у якому відбувається світіння збуджених атомів, має оптичний вихід на інтерференційний компаратор (рис. 3.10), за допомогою якого визначається кількість довжин хвиль, що укладаються між штрихами міри (лінійки), тобто довжина. Здійснення цього методу дало можливість знизити похибку відтворення метра приблизно до $4 \cdot 10^{-9}$ м (СКВ). Однак і цієї точності виявилось недостатньо для вирішення ряду науково-технічних задач. Пошуки кращого еталона продовжувалися.

У 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 такому визначенні швидкість світла постулюється рівною 299792458 м/с (точно), а метр визначається зі співвідношення $L = V \cdot t$, де $V = c$ – швидкість світла; $t = 1/299792458$ с.

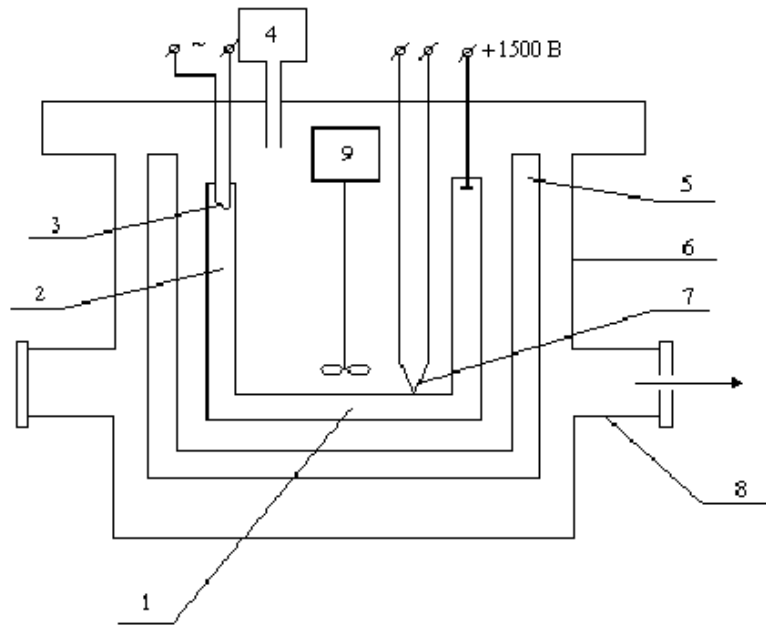


Рис. 3.9. Схема криптонового еталона метра: 1 – капіляр; 2 – газорозрядна трубка з криптоном; 3 – розжарений катод; 4 – манометр; 5 – судина Дюара з рідким азотом; 6 – герметична камера; 7 - термопара; 8 – окуляр; 9 – мотор з лопаткою для перемішування рідкого азоту



Рис. 3.10. Криптоновий еталон метра

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.

Неважко бачити, що для реалізації еталона довжини відповідно до цього визначення необхідно вирішити такі задачі:

- створити високостабільне (за частотою) джерело світлового випромінювання;

- виміряти частоту f цього випромінювання для визначення довжини його хвилі λ зі співвідношення $\lambda = c / f$;

- передати розмір одиниці довжини з діапазону довжин світлових хвиль (мікрометри) у діапазон практичного використання (поблизу метра).

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

До складу еталонного джерела випромінювання державного первинного еталона України відповідно до рекомендації МБМВ, входить група $He - Ne / J_2$ лазерів (рис. 3.11), стабілізованих з використанням ефекту насиченого поглинання в йоді-127 (довжина хвилі $\lambda = 0,633$ мкм, частота 473613, ... ГГц). Дане групове джерело має нестабільність $7 \cdot 10^{-12}$, СКВ (S_e) і НСП (θ_e) близько $1 \cdot 10^{-11}$.



Рис. 3.11. $He - Ne / J_2$ лазер

Точне вимірювання частоти лазерного джерела здійснюється за допомогою згаданого вище радіооптичного частотного моста (РОЧМ), що являє собою складний вимірювальний комплекс, який дозволяє виміряти дуже високі частоти лазерного випромінювання відносно більш низької частоти (5 МГц) державного еталона часу і частоти, з похибкою, близькою до похибки еталона. Основу РОЧМ складають помножувачі частоти, НВЧ генератори, лазери, нелінійні елементи, що забезпечують перетворення і синтез частот, системи фазового автотістроювання частоти.

Однак напряму виміряти за допомогою РОЧМ частоту $He - Ne / J_2$ лазера (близько 473 ТГц) – надзвичайно складна задача. У Росії ці вимірювання провели на частоті $He - Ne / CH_4$ лазера – 88 ТГц, в Україні – до 27 ТГц. Подальше підвищення вимірюваної частоти виконується за допомогою інтерференційних методів, шляхом порівняння довжин хвиль лазерів. У Росії таким методом про-

ведені вимірювання частоти $He - Ne / J_2$ лазера на $\lambda = 0,633$ мкм шляхом визначення відношення $\lambda_x / \lambda_{CH_4} = f_{CH_4} / f_x$ (частота $He - Ne / CH_4$ лазера вимірюється напряму). Структурну схему вимірювання частоти $He - Ne / J_2$ лазера подано на рис. 3.12.

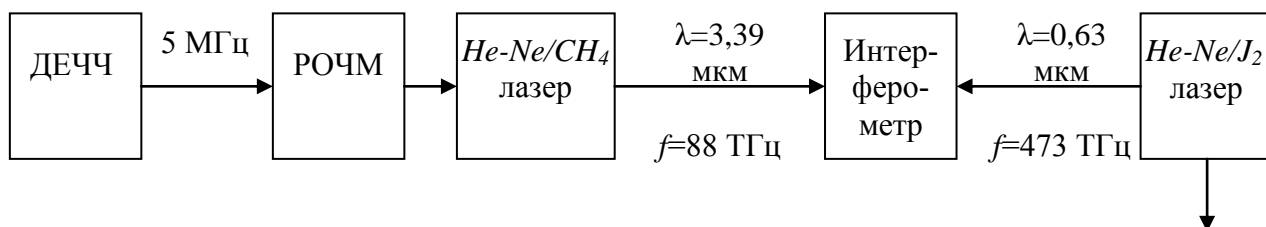


Рис. 3.12. Схема вимірювання частоти $He - Ne / J_2$ лазера

Третя задача – передача розміру одиниці “хвильового” метра від $He - Ne / J_2$ лазера до штрихових і кінцевих мір довжини здійснюється за допомогою того ж інтерференційного методу шляхом підрахунку числа $N + \delta$ напівхвиль $\frac{\lambda}{2}$, що укладаються на вимірюваній довжині $L = \frac{\lambda}{2}(N + \delta)$, де δ – дробова частина порядку інтерференції (вимірюється модуляційним методом).

Для здійснення цих вимірювань до складу еталона входить спеціальний інтерференційний компаратор (рис. 3.13).

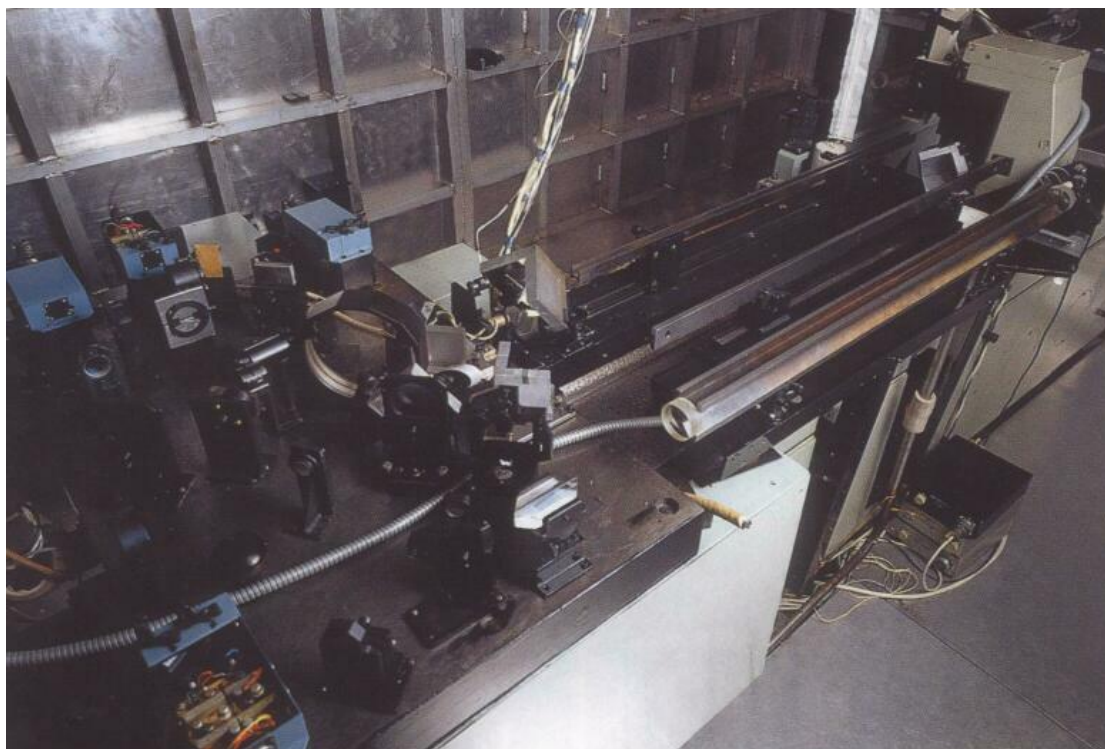


Рис. 3.13. Інтерференційний компаратор (усередині термостата)

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

Наведемо метрологічні характеристики державного первинного еталона одиниці довжини України [25]:

- діапазон вимірювань, м $0 - 1,0$;
- випадкова похибка (СКВ) $2 \cdot 10^{-11}$;
- невиключена систематична похибка $2,5 \cdot 10^{-11}$.

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

Ці характеристики відповідають світовому рівню.

Як зазначалося вище, прийняття нового визначення метра привело до прямого зв'язку одиниць часу (частоти) і довжини. Отже, у сукупності державний 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 еталон одиниць часу, частоти і довжини. При цьому в основі цього еталона лежать дві сталі: швидкість світла у вакуумі і частота переходу атома цезію-133, числові значення яких прийняті за міжнародною згодою. Наведемо для прикладу структуру російського державного еталона часу довжини і частоти (рис. 3.14).

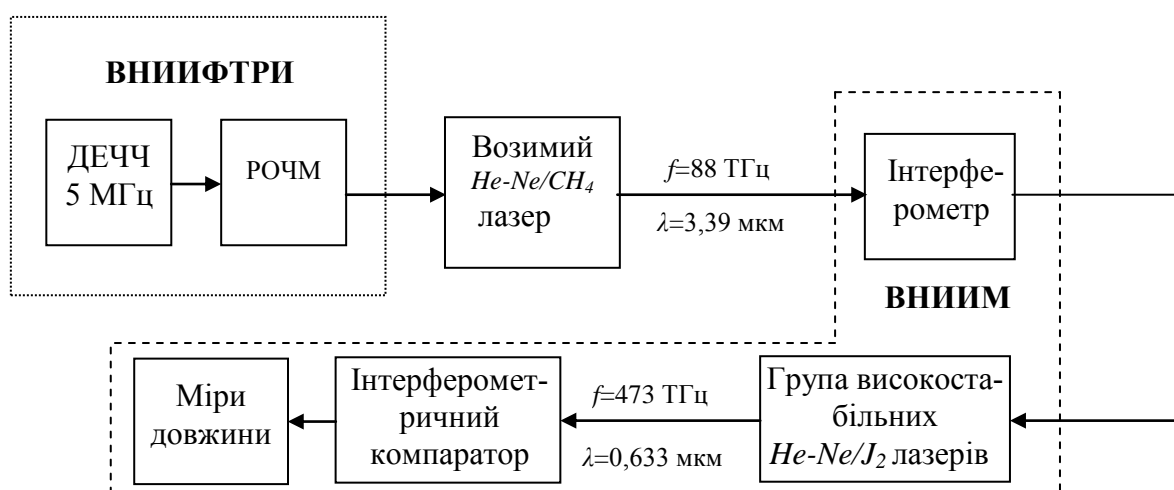


Рис. 3.14. Структура державного еталона часу, частоти і довжини

Особливістю цього еталона є те, що еталон часу і частоти і РОЧМ знаходиться у ВНИИФТРИ (Московська область), а інша апаратура – у ВНИИМ ім. Менделєєва (м. С.-Петербург). Через територіальну роз'єднаність цих інститутів

до складу еталона введено транспортабельний $He-Ne/CH_4$ лазер, довжина хвилі якого встановлюється за вихідним лазером РОЧМ і використовується для точного вимірювання довжини хвилі $He-Ne/J_2$ лазера, що входить до складу інтерферометра.

3.3 Ампер

З визначення сили струму як фізичної величини видно, що одиниця сили струму – ампер дорівнює кількості електрики, що проходить через поперечний переріз провідника в одиницю часу. Тому природно було б прийняти за основну електричну одиницю деякий заряд, який, наприклад, дорівнює заряду електрона чи визначеного числа електронів. Однак нині немає можливості здійснити з достатньою точністю еталон, що спирається на таке визначення. Через це довелося відмовитися від одиниці кількості електрики як основної електричної одиниці і прийняти як таку одиницю сили струму – ампер. Розмір ампера можна було б відтворювати за такими діями струму:

- через виділення теплоти при проходженні по провіднику;
- через осадження речовини на електродах при проходженні струму через електроліт;
- за пондеромоторними (механічними) діями струму на магніт чи провідник зі струмом.

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

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

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

Для реалізації еталона ампера в ряді країн були сконструйовані спеціальні “струмові ваги” (рис. 3.15).

Струмові ваги являють собою важільні рівноплечі ваги, у яких підвішена з одного боку рухлива котушка врівноважується вантажем, покладеним на чашку з протилежного боку.

Рухлива котушка входить у другу нерухому співвісно розташовану котушку. При проходженні цими послідовно з'єднаними котушками постійного елек-

тричного струму виникає сила взаємодії, рухлива котушка опускається, тому для зрівноважування на чашку ваг слід покласти додатковий вантаж.

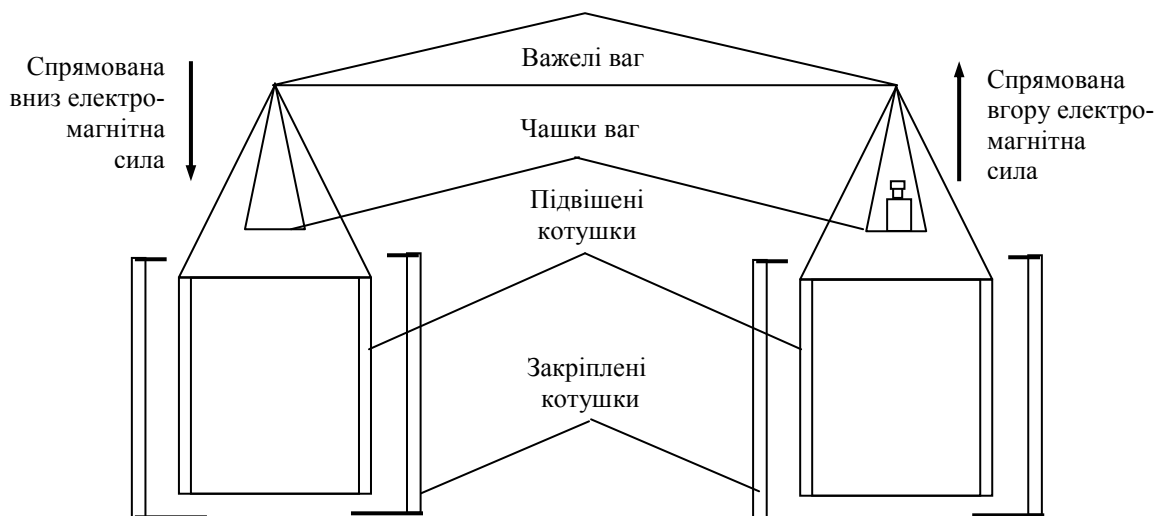


Рис. 3.15. Схема струмових ваг NPL

Відповідно до закону Ампера сила взаємодії струмів у котушках дорівнюватиме

$$F_1 = kI_1I_2 = kI^2 ,$$

де $I_1 = I_2 = I$ – сила струму в котушках; k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від форми і розмірів котушок, прийнятого значення відносної магнітної проникності середовища тощо.

З іншого боку ваг, у відповідності до другого закону Ньютона, діє сила

$$F_2 = mg ,$$

де m – маса врівноважуючого вантажу; g – прискорення сили ваги в місці розташування ваг.

При рівновазі ваг $F_1 = F_2$ і розрахункова формула для сили струму має вигляд:

$$I = \sqrt{\frac{mg}{k}} .$$

Державний первинний еталон ампера, створений у СРСР у 1975 р. у ВНИИМ, являв собою комплекс вимірювальних засобів у такому складі:

- струмові ваги з гирею масою 8,16044 г та з дистанційним керуванням;
- апаратура для передачі розміру одиниці, до якої входить котушка опору Р342, що одержала своє значення від первинного еталона Ома.

НСП відтворення розміру одиниці струму цього еталона становить близько $1 \cdot 10^{-5}$, СКВ – $4 \cdot 10^{-6}$.

Точності цього еталона, однак, було явно недостатньо для розвитку елект-

ричних вимірювань, а технічні можливості її підвищення були фактично вичерпані [26].

Крім того, навіть така точність була малодоступною для широкого кола споживачів, тому що вимірювальні процедури з відтворення ампера за допомогою струмових ваг настільки трудомісткі, що проводяться один раз у 10 – 15 років [26].

У зв'язку з успіхами квантової метрології з'явилася можливість відтворювати одиницю сили струму більш точно за допомогою непрямих вимірювань відповідно до закону Ома: $I = U/R$. При цьому розміри одиниць постійної електричної напруги U й опору R відтворюються на основі квантових ефектів Джозефсона і Холла. Більш докладно ці ефекти, а також створений за таким принципом еталон сили струму будуть розглянуті в розділі 4.

3.4 Кельвін

Температура* навколишнього середовища, предметів є активною величиною. Це вносить істотні особливості в її вимірювання, оскільки визначення активної величини, як правило, засновано на взаємодії яких-небудь 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.

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_0, T_1 . Як реперні (опорні) точки обирали точки, які 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 в 1655 – ртутний. У 1665 р. Християн Гюйгенс** і Роберт Гук*** запропонували точки плавлення льоду і кипіння води як основні для термометра. Пізніше були запропоновані

* Від латинського *temperatura* – нормальний стан, фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи.

** Huygens

*** Hook

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 в 1714 р. – ртутний термометри, в яких за 0 була взята найнижча температура взимку 1709 р., а за 12 градусів – температура тіла здорової людини. Згодом ця шкала була тричі послідовно розділена навпіл, у результаті чого в 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 град.

Шкала, запропонована в 1742 році шведським астрономом Андерсом Цельсієм***, має ті ж реперні точки, що і шкала Реомюра, тільки інтервал між ними поділяється на 100 градусів.

Показання термометрів залежали від роду термометричної речовини й умов її теплового розширення (рис. 3.16).

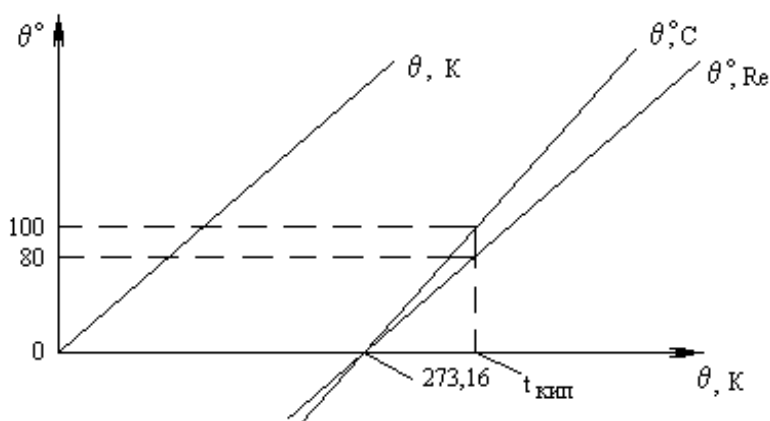


Рис. 3.16. Температурні шкали

Дослідження показали, що в природі не існує фізичних властивостей, зв'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

* Fahrenheit

** Reaumur

*** Celsius

**** Thomson (Kelvin)

температурну шкалу, яка не залежить від роду термометричної речовини. Єдиною реперною точкою в ній пропонувалося зробити потрійну 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 потрійної точки води. Припустимим є вираження термодинамічної температури в градусах Цельсія.

Потрійна точка води може бути відтворена з похибкою $0,0001 \text{ } ^\circ\text{C}^*$. Схема судини, що відтворює потрійну точку води, зображена на рис. 3.17, а її зовнішній вигляд – на рис. 3.18. За температуру реперної точки була прийнята температура $273,16 \text{ K}$ 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 – кількість 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.

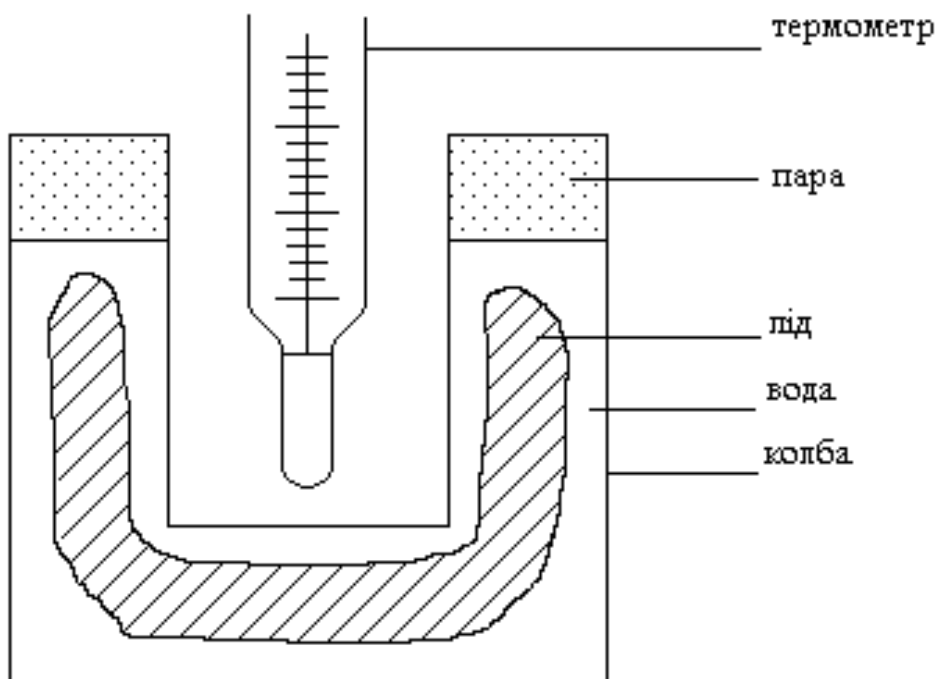


Рис. 3.17. Схема посудини, що відтворює потрійну точку води

Відтворення термодинамічної шкали температур пов'язане із значними труднощами. Тому ІХ Генеральна конференція з мір та ваг у 1948 р. встановила **практичну** температурну шкалу, відтворену за визначеними сталими реперни-

* Похибка відтворення температурних точок танення льоду і кипіння води на порядок більше, ніж похибка відтворення потрійної точки води.

ми точками (табл. 3.2). Температура в реперних точках визначається газовим термометром, що використовує співвідношення між об'ємом, тиском і температурою ідеального газу (рис. 3.19). У газовому термометрі ртутний манометр вимірює тиск сталого об'єму газу в балоні 1.

Перевага газового термометра порівняно з ртутним полягає в тому, що розширення газу в 20 разів більше, ніж ртуті, і тим самим вплив температурного розширення скла (одного з основних джерел похибки ртутного термометра) зводиться до мінімуму. Екстраполяція залежності тиску газу від температури дає при нульовому тиску (і обсязі) ідеального газу значення абсолютного нуля $-273,15^{\circ}\text{C}^*$ (рис. 3.20).



Рис. 3.18. Пристрій, що відтворює потрійну точку води (ВНИИМ), виготовлений з кварцу і заповнений водою вищого ступеня очищення

Це найбільш точні, але дуже трудомісткі вимірювання, що виконуються лише в деяких провідних метрологічних лабораторіях світу. Основна складність їх полягає в урахуванні невідповідності реального газу ідеальному.

* Температура точки танення льоду, взятої за 0 у шкалі Цельсія, менше температури потрійної точки води на $0,01^{\circ}\text{C}$.

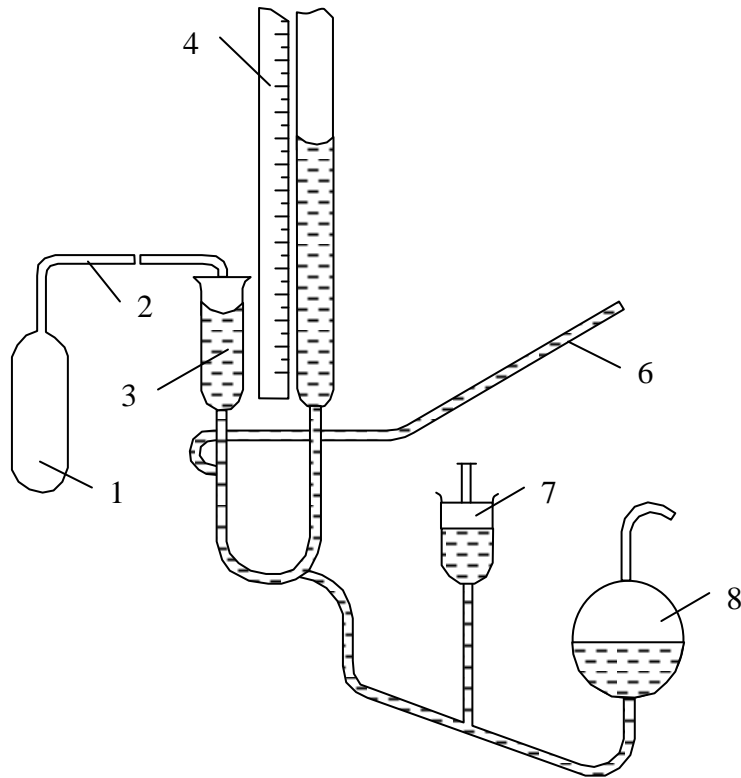


Рис. 3.19. Схема газового термометра: 1 – робочий резервуар; 2 – капіляр; 3 – коротке коліно манометра; 4 – шкала; 5 – довге коліно манометра; 6 – трубка для заповнення системи ртуттю; 7 – поршень; 8 – резервуар із ртуттю

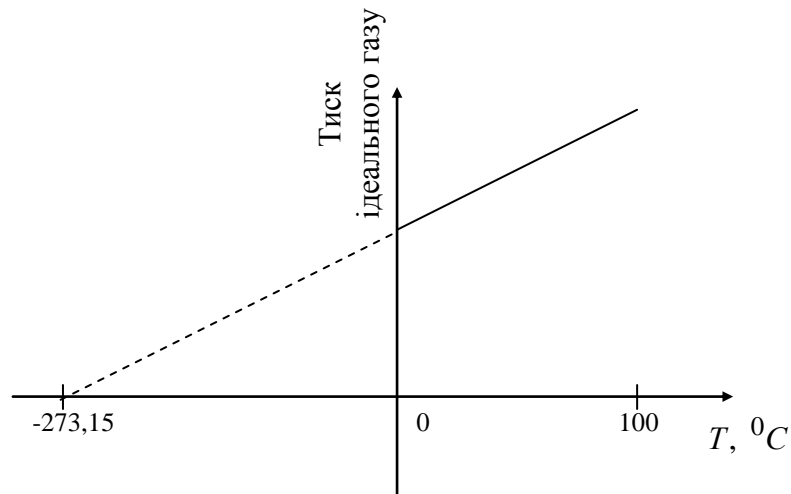
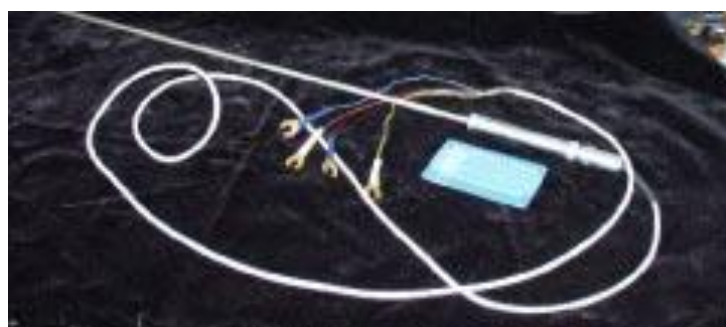


Рис. 3.20. Шкала газового термометра

Отже, у загальному випадку еталон складається з пристроїв, що реалізують наведені в таблиці реперні точки, а також платинового термометра опору (рис. 3.21). Останній відіграє роль інтерполяційного приладу, що здійснює прив'язку всієї шкали температур до цих реперних точок.

Основні реперні точки МТШ-90

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



а



б

Рис. 3.21. Платинові термометри опору
ВНИИМ (ЭТС-100) (а) і BNM* (б)

В Україні температурна шкала МТШ-90 підтримується трьома державними еталонами [27]: з діапазонами температур 13,803 – 273,16 К; 273,16 – 1357,77 К; 1357,77 – 2800 К.

Еталон у діапазоні низьких температур 13,803 – 273,16 К (див. рис. 3.22) містить установки, що відтворюють температури потрійних 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.

* BNM – Національне бюро з метрології Франції

Еталон у діапазоні 273,16 – 1357,77 К відтворює температуру потрібних точок води (основний еталон), плавлення галію, твердіння індію, олова, цинку, алюмінію і міді. До складу еталона входить також вимірювальний міст і набір платинових термометрів опору.



Рис. 3.22. Еталон одиниці температури в діапазоні 13,8 – 273,16 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 базується на законі Планка. Основною вимірювальною операцією при екстраполяції температурної шкали є компарування яскравостей, що здійснюється за допомогою спеціально розроблених пристроїв (рис. 3.23).

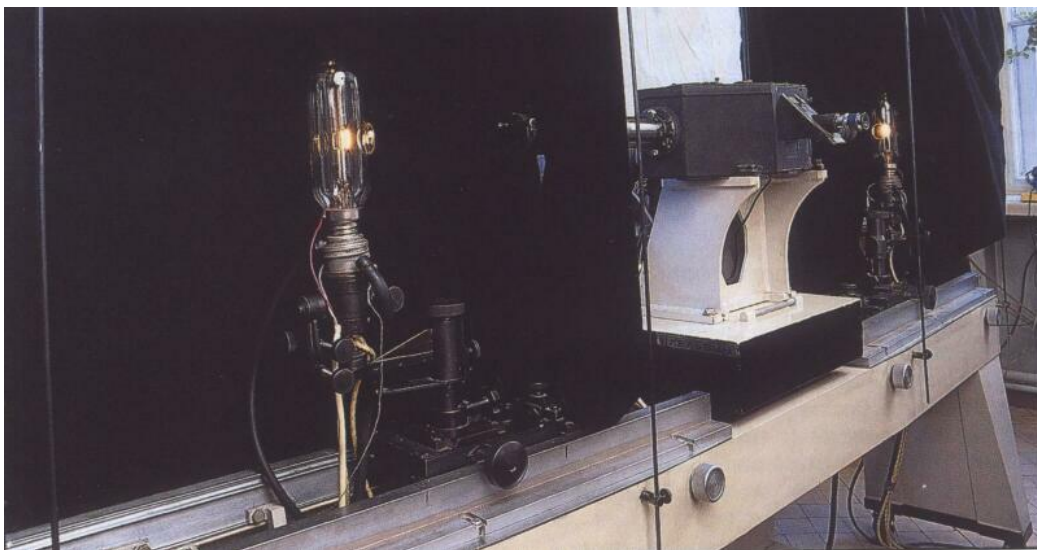


Рис. 3.23. Спектрокомпаратор зі складу фотоелектричної апаратури для побудови температурної шкали оптичним методом

Державні еталони України мають такі метрологічні характеристики:

- у діапазоні від 13,8 до 273,16 К: $\theta_0 = (1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3})$ К, $S_0 = (5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3})$ К;
- у діапазоні від 273,16 до 1357,77 К: $\theta_0 = (2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3})$ К, $S_0 = (1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2})$ К;
- у діапазоні від 1357,77 до 2800 К: $\theta_0 = (0,1 - 0,5)$ К, $S_0 = (0,2 - 1,3)$ К.

3.5 Кандела

Сила світла джерела видимого випромінювання визначається світловим потоком, що сприймається оком людини, з урахуванням його чутливості до різних ділянок частотного спектра. Одиниця сили світла та її еталони пройшли велику еволюцію. У Німеччині з 1869 р. використовувалася парафінова свічка діаметром 20 мм і висотою полум'я 50 мм. У 1893 р. Міжнародним конгресом електриків за еталон одиниці сили світла була прийнята аміл-ацетатна лампа з висотою полум'я 40 мм при його ширині 8 мм [8].

З 1924 р. за рішенням Міжнародної комісії з освітленості основним світловим еталоном (еталоном яскравості) був визнаний повний випромінювач (або “абсолютно чорне тіло”), виконаний за особливою специфікацією.

У 1948 р. ГКМВ прийняла нову назву для одиниці сили світла – кандела (оскільки французькою мовою свіча – chandelle). Визначення кандели також неодноразово уточнювалося. У 1979 р. було прийнято нині діюче визначення:

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

Це визначення встановлює зв'язок світлових та енергетичних величин, що визначається функцією світлової ефективності

$$K_v(\lambda) = \frac{\Phi_v(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} = K_m V(\lambda) ,$$

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

Максимальна світлова ефективність, як обернена величина електричної сили світла ($\frac{1}{683} \frac{Вт}{ср}$), була прийнята як метрологічна стала, що дорівнює 683 лм/Вт на частоті випромінювання $540 \cdot 10^{12}$ Гц. Ця частота відповідає максимальній чутливості людського ока (зелена область видимого світла).

Кандела за допомогою згаданого вище абсолютно чорного тіла може відтворюватися в такий спосіб (рис. 3.24).

* ср – стерadian.

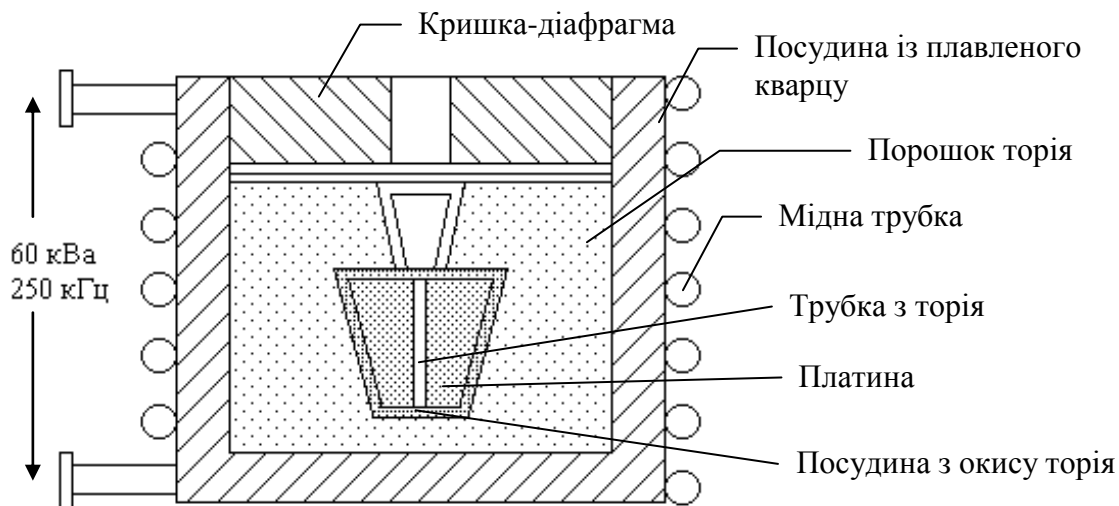


Рис. 3.24. Еталон кандели на основі абсолютно чорного тіла

Повний випромінювач являє собою невелику трубку з окису торія діаметром близько 2,5 мм, занурену в чисту платину. Платина, в свою чергу, знаходиться в посудині, спресованій з порошку плавненого окису торія, оточеній порошком з окису торія. Усе це поміщено в зовнішню посудину з плавненого кварцу. Зовнішня посудина оточена невеликою кількістю витків мідної охолоджувальної водою трубки.

По трубці пропускається струм високої частоти (близько 250 кГц), що нагріває платину до її плавлення. Разом із платиною нагрівається і трубка з торія. Світло випромінюється з порожнини трубки через отвір у верхній її частині. Яскравість повного випромінювання при температурі твердіння платини порівнюється за допомогою фотометра з яскравістю особливих ламп розжарення, що використовуються як вторинні еталони. Частота монохромного випромінювання повного випромінювача знаходиться в зеленій області видимого світла і відповідає максимальній чутливості людського ока.

Інші світлові одиниці, такі, як люмен (одиниця світлового потоку) і люкс (одиниця освітленості), визначаються через канделу.

Нове (1979 р.) визначення кандели дає можливість її реалізації не тільки за допомогою абсолютно чорного тіла, але і “абсолютно чутливих” (криогенних) приймачів (метод еталонного вимірювача).

На цей час такі еталони створили деякі національні метрологічні центри. Спрощену структурну схему еталона на основі такого криогенного приймача-радіометра наведено на рис. 3.25.

Криогенний радіометр охолоджується рідким гелієм при температурі 5 К і працює на принципі електричного заміщення. Спочатку визначається абсолютна спектральна чутливість $s(\lambda)$ (в амперах на ват) на основі шкали абсолютної спектральної чутливості і вимірюється площа апертури A . Світлова ефективність S_λ (А/лк) визначається з виразу

$$S_\lambda = \frac{A \int S(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{K_m \int S(\lambda) V(\lambda) d\lambda},$$

де $S(\lambda)$ – розподіл вимірюваної спектральної потужності світла.

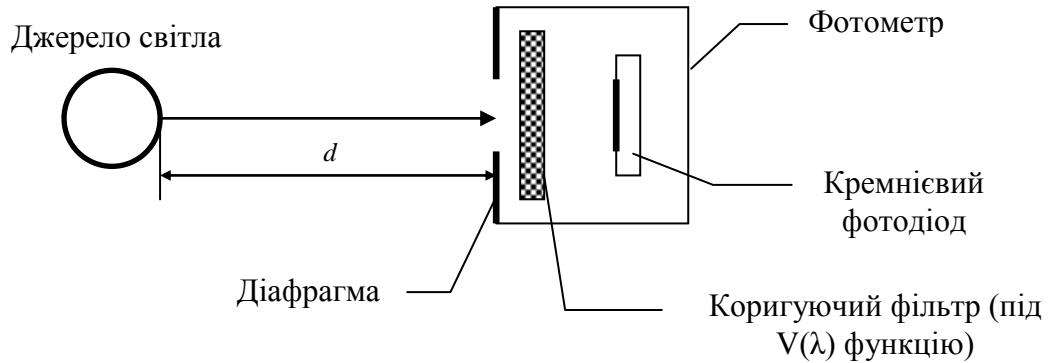


Рис. 3.25. Криогенний приймач-радіометр

Сила світла (у кд) визначається за формулою

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

де d – відстань від джерела світла до площини діафрагми (у метрах); Ω_0 – тілесний кут (у стерadianах); i – вихідний струм фотометра (в амперах).

Шкала спектральної чутливості в сучасних еталонах відтворюється спеціальними приймачами-пастками (трап-детекторами) на кремнієвих фотодіодах (більш докладно це питання тут не розглядається).

Саме на основі криогенного радіометра побудований державний еталон України [19], що має НСП $\theta_0 \leq 1,5 \cdot 10^{-3}$ і СКВ $S_0 \leq 1 \cdot 10^{-3}$.

Подальша практика експлуатації та дослідження еталонів покаже перевагу того чи іншого методу побудови еталона кандели.

3.6 Кілограм

Визначення одиниці маси – кілограма – було дано у 1901 р. III Генеральною конференцією з мір та ваг у такому вигляді:

“Кілограм – одиниця маси і дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма”.

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

Виготовлений на основі цих зважувань перший прототип кілограма являв собою платинову циліндричну гирю висотою 39 мм, що дорівнює його діаметру. Він був переданий на збереження в Національний Архів Франції (рис. 3.26).



Рис. 3.26. Прототип кілограма, що зберігається в Архіві Франції

У XIX ст. були зроблені повторні ретельні вимірювання маси 1 дм^3 води, при цьому було встановлено, що ця маса приблизно на 0,28 г менше маси прототипу Архіву.

Для того, щоб при подальших, більш точних зважуваннях не змінювати значення одиниці маси, Міжнародною комісією з еталонів метричної системи в 1872 р. було вирішено за одиницю маси прийняти масу прототипу кілограма Архіву.

У 1883 р. були виготовлені 42 прототипи кілограма з платино-іридієвого сплаву (90% платини і 10% іридію) фірмою “Джонсон, Маттей і К⁰”. Копії №12 і №26 були отримані за жеребкуванням Росією в 1889 р. відповідно до Метричної конвенції. Копія №12 стала державним еталоном Росії. Еталон зберігається на кварцовій підставці під двома скляними ковпаками в сталевій шафі особливого сейфа, що знаходиться в термостатованому приміщенні ВНИИМ, м. С.–Петербург.

Нині до складу державного первинного еталона одиниці маси Росії входять

обидва прототипи кілограма №12 і №26, набір еталонних гир від 1 до 500 г із платино-іридієвого сплаву, еталонні ваги номер 1 (Рупрехта) і номер 2 (ВНИИМ) з дистанційним керуванням, що служать для передачі розміру одиниці маси від первинного еталона вторинному і робочому еталонам (рис. 3.27). Еталонні ваги мають межі зважування 1 кг, 200, 25 і 3 г.



Рис. 3.27. Еталонні ваги з найбільшою межею зважування 1 кг

Похибка відтворення маси еталонном кілограма (СКВ) не перевищує $2 \cdot 10^{-9}$.

До складу державного еталона одиниці маси України входять три гирі номінальною масою 1 кг, виготовлені й атестовані в Росії (ВНИИМ), а також:

- набір еталонних гир від 1 до 500 г;
- еталонні ваги-компаратор фірми “Sartorius”;
- еталонні автоматизовані ваги власної конструкції.

СКВ результатів вимірювання маси еталонних гир 1 кг не перевищує $8 \cdot 10^{-9}$.

Як показують результати міжнародних звірень, незважаючи на всі обережності, за 90 років маса еталонної гирі Росії збільшилася на 0,02 мг. Пояснюється це адсорбцією молекул з навколишнього середовища, осіданням пилу на поверхню гирі й утворенням тонкої корозійної плівки. У зв'язку з цим, а також через значні практичні незручності роботи з прототипами визнано доцільним шукати шляхи створення природного еталона кілограма. Сьогодні такі роботи ведуться в найбільших метрологічних центрах світу [8, 29].

3.7 Моль

Моль дорівнює кількості речовини, що містить стільки ж структурних елементів (атомів, молекул чи інших часток), скільки атомів міститься в 0,012 кг вуглецю - 12.

У зазначеній масі ізотопу вуглецю-12 міститься $6,022 \cdot 10^{23}$ атомів. Це число називається числом Авогадро (A). Якщо число структурних елементів, що складають речовину (N), відомо, то ділення його на число Авогадро дає кількість речовини в молях $X_{\text{моль}} = N/A$. Можна за необхідності відтворити 1 моль будь-якої речовини як $6,022 \cdot 10^{23}$ його структурних елементів. Маса 1 моля водню складає 2 г, кисню – 32 г, води – 18 г и т.д. Оскільки для визначення кількості речовини досить знати масу речовини і кількість структурних елементів, що містяться в ньому, то в еталоні моля немає необхідності, важливо точно знати число Авогадро. На 2009 рік відносно середньоквадратичне відхилення визначення числа Авогадро становить близько $3 \cdot 10^{-7}$.

3.8 Висновок

Вище було показано, що методологія і техніка відтворення основних одиниць SI постійно вдосконалюються. Це пов'язано зі зростаючими потребами людства в розвитку науки, техніки, удосконаленні технологій. Особливо скажемо про основну одиницю SI від електрики – ампер. Завдяки відкриттю нових макроскопічних квантових ефектів, одиниці таких похідних величин, як напруга й опір, стали відтворюватися істотно точніше порівняно з ампером. Ряд країн створили апаратуру, яка відтворює ампер на основі закону Ома через “квантові” вольт і ом. Це призвело до парадоксальної ситуації, коли основна одиниця не тільки відтворюється через похідні, але й має порівняно з ними значно більшу похибку відтворення. Залишається сподіватися, що подальший розвиток науки і сучасних технологій в найближчі часи усуне цей перекис, а також змінить ситуацію з відтворенням найбільш консервативної одиниці системи SI – кілограма. Шляхи вирішення цієї проблеми наводяться в розділі 9.

Контрольні питання

1.

4 СИСТЕМА ЕТАЛОНІВ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОРАДІОВИМІРЮВАНЬ. КВАНТОВІ ЕТАЛОНИ

4.1 Одиниці електричних величин. Еволюція методології відтворення

Як уже було сказано, основною одиницею SI від електрики є ампер. В електрорадіотехніці застосовується також велика кількість похідних одиниць (близько 50). Однак далеко не всі ці одиниці відтворюються за допомогою еталонів, тобто централізовано. Існує система критеріїв – науково-технічних, економічних, організаційних, – відповідно до яких приймається рішення про створення еталона тієї чи іншої одиниці. В галузі електрорадіовимірювань у різних країнах централізовано відтворюються від 12 до 15 одиниць. Найбільш уживані похідні одиниці SI в електриці, їх позначення і визначення через інші одиниці наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Найбільш уживані похідні одиниці SI в галузі електрорадіовимірювань

Похідна величина		Одиниця ФВ		Визначення похідної одиниці	
Найменування	Позначення	Найменування	Позначення	Через інші одиниці SI	Через основні одиниці SI
Кількість електрики (електричний заряд)	Q	кулон	Кл (C)	-	$\text{с} \cdot \text{А}$
Електрична напруга, електрорушійна сила (ЕРС)	U	вольт	В (V)	Вт/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Електричний опір	R	ом	Ом (Ω)	В/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Електрична ємність	C	фарад	Ф (F)	Кл/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$
Індуктивність	L	генрі	Гн (H)	Вб/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$
Електрична провідність	G	сіменс	См (S)	А/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Частота	f	герц	Гц (Hz)	-	с^{-1}
Потужність	P	ват	Вт (W)	Дж/с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Магнітний потік	Φ	вебер	Вб (Wb)	Вс	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнітна індукція	B	тесла	Тл (T)	Вб/м ²	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Напруженість електричного поля	E			В/м	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Напруженість магнітного поля	H			А/м	$\text{м}^{-1} \cdot \text{А}$

Наведемо деякі дані з історії відтворення електричних одиниць.

Приблизно до 1980 р. існувала система еталонів, яка базувалася на реалізації ампера, виходячи з визначення в SI, через механічну силу (*ампер-ваги*),

приклад якої описаний вище (апаратурні рішення різних країн відрізняються лише технічними деталями).

Маючи реалізований у такий спосіб ампер можна було одержати вольт, виразивши його через роботу, вироблену теплом, що виникає при проходженні струму.

Фактично у такий спосіб у 1948 р. на IX Генеральній конференції з мір та ваг (ГКМВ) був визначений ом – через потужність, що розсіюється на деякому резисторі при проходженні через нього струму силою 1 А. На практиці, однак, цей шлях виявився незадовільним, тому що механічні вимірювання потужності не могли бути проведені з відносною похибкою навіть на рівні $1 \cdot 10^{-6}$.

Зазначимо, що замість ампера можна відтворити вольт за допомогою *вольт-ваг*, що являють собою конденсатор, у якому переміщення пластин під дією електричного поля врівноважується силою їхньої ваги. При цьому зміна енергії електричного поля $\Delta W = \frac{1}{2} U^2 \Delta C$ дорівнює зміні механічної енергії системи $\Delta W_m = mg \Delta s$. Звідси можна визначити електричну напругу U , прикладену

до пластин $U = \sqrt{2mg \frac{\Delta s}{\Delta C}}$. За даними РТВ, відтворення вольта може бути здійснене з похибкою $1 \cdot 10^{-6}$. Однак цей шлях також дуже складний та трудомісткий.

Альтернативний шлях полягав у знаходженні імпедансу за допомогою геометричних вимірювань: таким шляхом можна було б визначити індуктивність і ємність. Потім за допомогою моста змінного струму можна порівнювати значення індуктивності (ємності) на даній частоті з опором еталонного резистора.

Спочатку використовувалася індуктивність, яку можна розрахувати за допомогою інтеграла Неймана. Для цього необхідно було виготовити циліндричний каркас, переважно з кварцового скла, зі спіральною канавкою на поверхні, а потім намотати на нього дріт з точно відомим значенням діаметра, строго постійним по всій її довжині. Операції з виготовлення такої котушки і самих вимірювань дуже складні і трудомісткі, і потрібно було прикласти багато зусиль, щоб реалізувати деяку індуктивність з похибкою на рівні $1 \cdot 10^{-6}$. Незважаючи на ці технічні труднощі, протягом багатьох років користувалися саме цим способом реалізації імпедансу, поки в 1956 р. не була знайдена конфігурація, для якої стало можливим провести точний розрахунок ємності. Це так званий розрахунковий конденсатор Томпсона – Лампарда* з перехресними ємностями. Перевага цього конденсатора полягає в тому, що для визначення значення ємності потрібно тільки одне вимірювання довжини, що може бути виконане з високою точністю і значно простіше, ніж вимірювання при визначенні індуктивності (докладніше про розрахунковий конденсатор мова йтиме нижче).

Такі конденсатори були сконструйовані в ряді країн, включаючи Росію. Похибка відтворення одиниці ємності таким конденсатором становила в різних країнах від $2 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-7}$.

За допомогою розрахункового конденсатора, еталона частоти і квадратур-

* Thompson, Lampard

ного моста змінного струму можна більш точно, ніж у випадку розрахункової індуктивності, визначити опір резистора.

Реалізуючи таким чином еталон опору, можна встановити електрорушійну силу (ЕРС) деякого гальванічного елемента (як такі застосовувалися насичені нормальні елементи (ННЕ)) через значення струму, що створює таку ж різницю потенціалів, при проходженні через резистор з відомим опором. Сила струму при цьому вимірюється на струмових вагах, а ННЕ служать еталонами ЕРС (рис. 4.1).

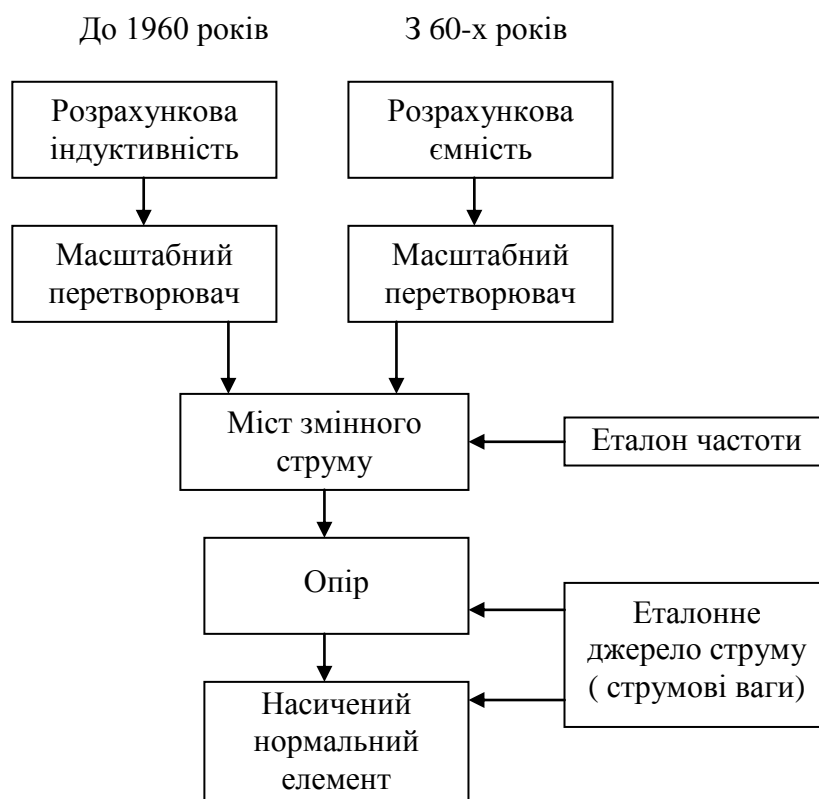


Рис. 4.1. Схема реалізації електричних одиниць

Неважко побачити, наскільки тривалу і трудомістку процедуру являла собою реалізація електричних одиниць за даною схемою, не говорячи вже про високу експериментальну майстерність, якої вона вимагає. Зокрема, абсолютне визначення сили струму за допомогою ампер-ваг з цих причин здійснювалося лише один раз у 10-15 років (!) [1]. Крім того, практичні операції зі струмовими вагами обмежуються струмом силою порядку 1 А, іншими словами, широке застосування струмових ваг у метрологічній практиці неможливе. До цього слід додати, що для збереження одиниць напруги та опору в інтервалах між абсолютними вимірюваннями сили струму та імпедансів необхідно було б мати велику кількість ННЕ та еталонних резисторів, зберігати їх у спеціальних умовах і зв'язати їх між собою через визначені інтервали часу.

Отже, склалася ситуація, коли недосконалість електричних еталонів почала гальмувати розвиток ряду галузей науки та техніки. З'явилася настійна потреба у створенні нової системи електричних еталонів.

Ситуація істотно змінилася з відкриттям ряду квантових ефектів, а головне, з усвідомленням можливості створення принципово нових – природних еталонів, що спираються на ці ефекти та фундаментальні фізичні сталі [13].

4.2 Квантові ефекти та еталони електричних одиниць на їх основі

Відкриття квантових ефектів (у порядку хронології): ядерного магнітного резонансу (Блох, Парсель*, 1946 р.), Джозефсона** (1962 р.), Холла (Клітцинг***, 1980 р.) зробило, без перебільшення, революцію в метрології в галузі електрики. З'явилася реальна можливість кардинально підвищити точність відтворення ряду електричних одиниць.

Ефект ядерного магнітного резонансу (ЯМР) дозволяє визначити індукцію магнітного поля B шляхом вимірювання частоти прецесії f системи атомних ядер у зразку речовини, яку поміщено в магнітне поле [30 – 31]:

$$B_{\text{ямр}} = \frac{2\pi f}{\gamma}, \quad (4.1)$$

де γ – гіромагнітне відношення робочої речовини.

Найбільш широко для вимірювання використовуються ядра водню – протони та їхнє гіромагнітне відношення γ_p , що є однією з фундаментальних фізичних сталих (ФФС).

Ефект Джозефсона дозволяє відтворювати значення постійної напруги $U_{\text{Дж}}$ шляхом опромінення спеціальної надпровідної структури, що знаходиться в криогенному середовищі, НВЧ-сигналом частотою f_0 відповідно до виразу [32, 34]

$$U_{\text{Дж}} = n \frac{hf_0}{2e}, \quad (4.2)$$

де $\frac{2e}{h} = K_{\text{Дж}}$ – стала Джозефсона; $n = 1, 2, 3 \dots$ – ціле число.

Квантовий ефект Хола також реалізується за допомогою спеціальної надпровідної структури, поміщеної в магнітне поле, дає можливість відтворювати фіксовані значення електричного опору [33]

$$R_X = \frac{h}{me^2}, \quad (4.3)$$

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

Говорячи про квантові ефекти, згадаємо також про ефект “одноелектрон-

* Bloch, Purcell

** Josephson

*** Klitzing

ного тунелювання” або ефект Ліхарева (у витоків ефекту стояв російський учений Ліхарев). Цей ефект виявляється у виникненні сходинок на осі струму вольтамперних характеристик надпровідних джозефсонівських переходів малої ємності при їхньому опроміненні СВЧ-полем (у відмінності від класичного джозефсонівського ефекту, де ці сходинок мають місце на осі напруги). При цьому відстань між сходинками (тобто значення сили струму I) залежить лише від частоти електромагнітного поля 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. 4.2), що може стати серйозним імпульсом до подальшого розвитку метрології в електриці.

Експериментально спостерігалися сходинок струму на вольтамперних характеристиках надпровідних гранульованих плівок з олова на частотах порядку 90 ГГц. За даними РТВ, там удалося відтворити струм порядку 1 нА на частоті опромінення 4,7 ГГц (похибка не наводиться). Експериментальні дані, проте, поки дуже скромні і не дозволяють розглядати питання про практичну побудову еталона. Однак, провідні світові центри метрології продовжують роботи в цьому напрямку.

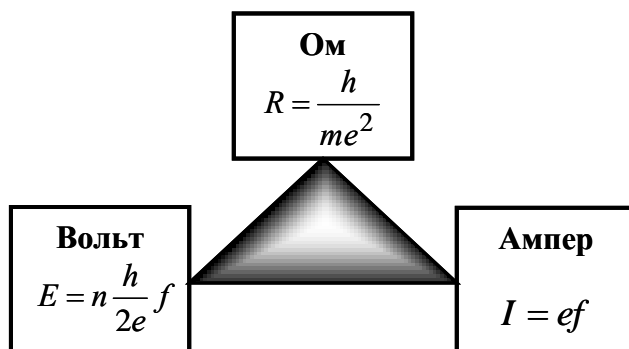


Рис. 4.2. “Трикутник” квантових еталонів

Як вже було сказано, відкриття квантових ефектів і створення на їх основі принципово нових еталонів дозволило побудувати нову систему еталонів в галузі електрорадіовимірювань.

4.3 Система еталонів в галузі електрорадіовимірювань

Еталонні бази різних країн мають свої особливості, однак аналіз загального рівня розвитку методів відтворення одиниць вимірювань і досвіду розвинених країн дозволяє говорити про деякі загальні закономірності побудови оптимальної еталонної бази в розглянутій галузі (рис. 4.3).

Основу системи еталонів становлять такі квантові еталони: еталон одиниці часу (частоти), що базується на атомному переході в ізотопі цезію Cs^{133} – се-

кунди; еталон одиниці електрорушійної сили і постійної напруги – вольт, що базується на ефекті Джозефсона; еталон одиниці електричного опору – ома, що базується на квантовому ефекті Холла; еталон одиниці магнітної індукції – тесла, що базується на явищі ядерного магнітного резонансу. Саме ці еталони, завдяки високій точності, надійності та доступності, стали базовими еталонами системи.

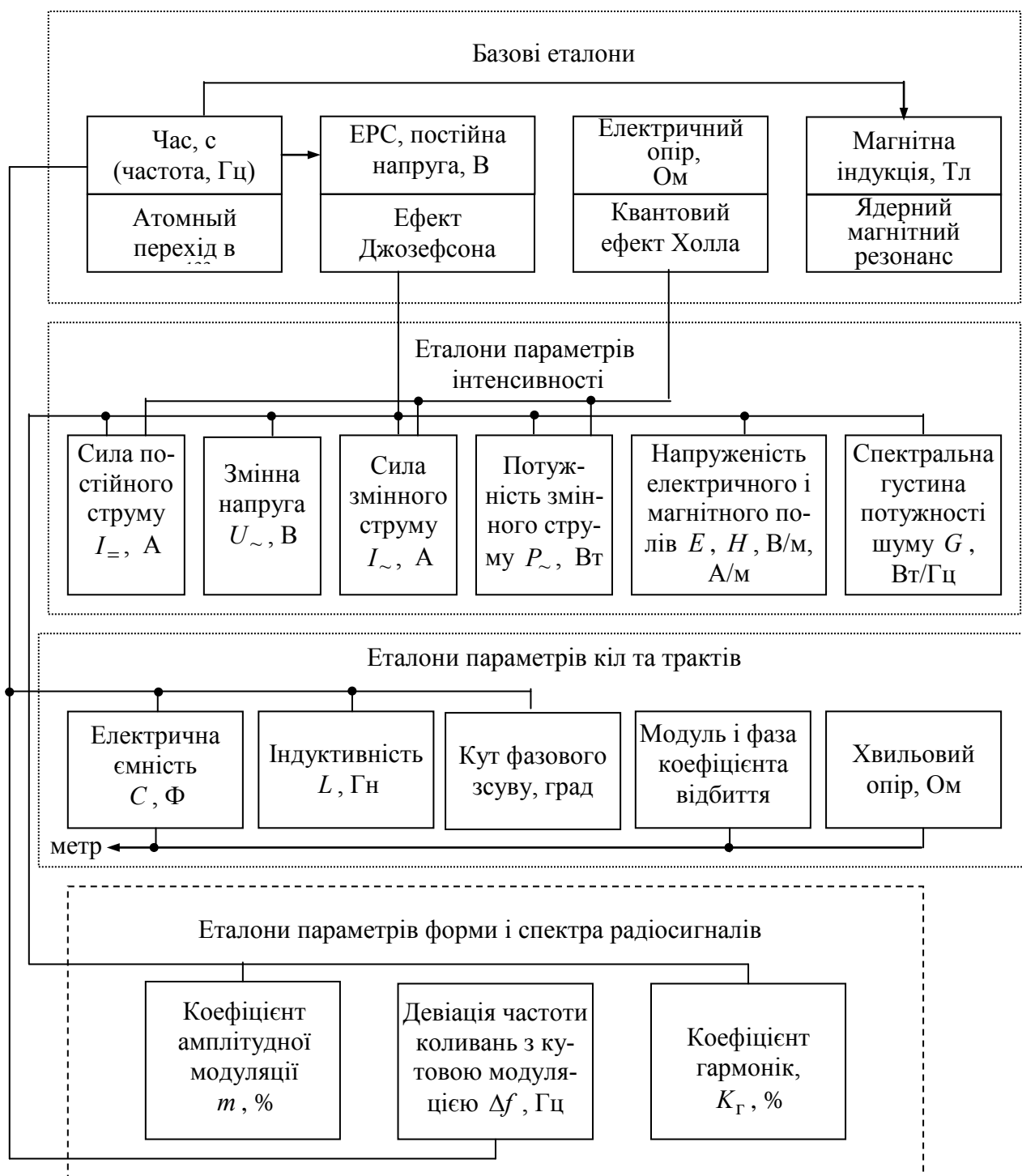


Рис. 4.3. Система еталонів у галузі електрорадіовимірювань

Еталонна база в галузі електрики являє собою не просто сукупність етало-

нів, але систему з досить розвиненими зв'язками як між окремими еталонами, так і з еталонами інших галузей вимірювань. Радіотехнічні еталони є складовою частиною цієї системи. Оскільки електричні одиниці, як правило, відтворюються з найвищою точністю на постійному струмі чи струмі низької частоти, а потім “переносяться” у радіодіапазон, можна вважати, що електричні еталони є метрологічною основою радіотехнічних еталонів. При загальній кількості одиниць, що застосовуються в електрорадіовимірюваннях (ЕРВ), більше п'ятидесяти централізовано, тобто за допомогою еталонів, відтворюються в різних країнах лише 10 – 15 одиниць. Оскільки частотний і динамічний діапазони застосування багатьох одиниць дуже широкі, у ряді випадків для відтворення однієї і тієї самої одиниці створюється кілька еталонів (приклад: еталони вольт на постійному струмі, у НЧ-діапазоні, у ВЧ-діапазоні, для високих напруг постійного та змінного струму).

Перейдемо до розгляду квантових (базових) еталонів системи (еталон одиниці часу вже розглянутий у розділі 3, п. 3.1).

4.4 Еталон вольт на ефекті Джозефсона

4.4.1 Фізична суть ефекта Джозефсона

Ефект Джозефсона виникає за деяких умов в контактах двох надпровідників, розділених тонким шаром діелектрика (рис. 4.4) [32, 34]. Ефект одержав назву за ім'ям англійського вченого Б. Джозефсона, що відкрив його в 1962 році.

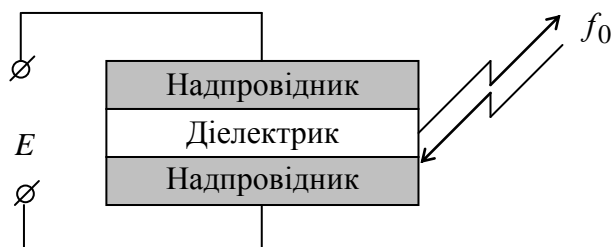


Рис. 4.4. Схематичне зображення джозефсонівського переходу

Науковий опис цього ефекту виходить за рамки даного посібника, тому розглянемо його фізичну суть коротко. Відомо, що при температурі нижче визначеної критичної $T_{кр}$, властивій даному матеріалу чи сплаву, останній переходить в особливий надпровідний стан, у якому електричні й магнітні властивості принципово відрізняються від тих, які метал (сплав) має при звичайних температурах. Виникнення надпровідного стану пояснюється появою особливого роду носіїв електричного заряду – зв'язаних електронних (куперівських) пар, які утворюються при $T < T_{кр}$. Наведемо такий приклад (рис. 4.5).

Якщо постійну напругу E прикласти до надпровідника S , у колі потече електричний струм I , а падіння напруги на надпровіднику буде дорівнювати

нулю (рис. 4.5 а).

Якщо тепер надпровідник розділити на 2 частини з великою відстанню між ними, струм текти не буде, а вольтметр покаже напругу джерела (рис. 4.5 б).

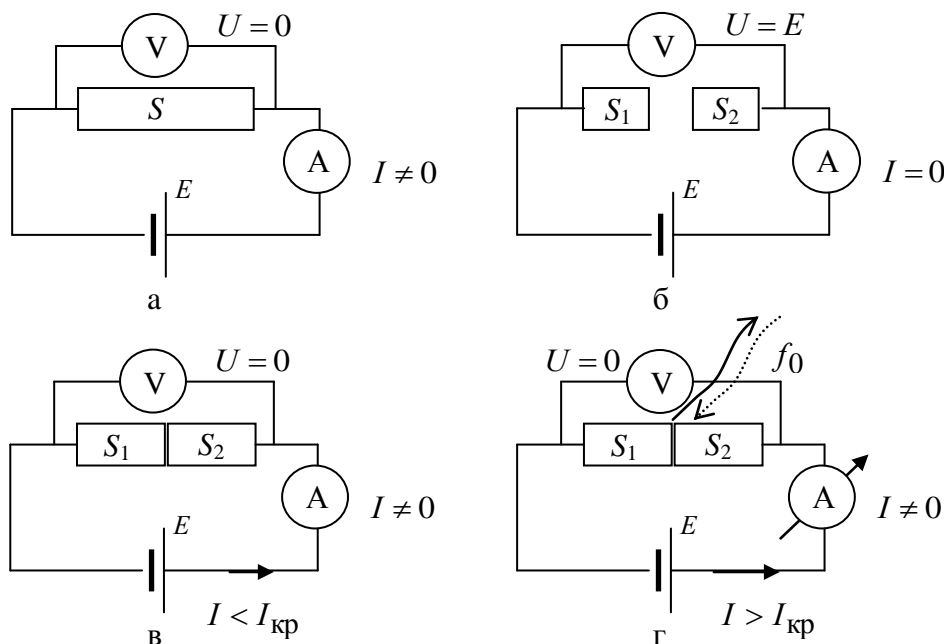


Рис. 4.5. До пояснення фізичної суті ефекту Джозефсона

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. 4.5 в). Це явище одержало назву стаціонарного ефекту Джозефсона.

При збільшенні струму більше деякого критичного надлишок енергії випромінюється у вигляді кванта світла – фотона з енергією $2eU$, тобто коло починає генерувати ВЧ-напругу (рис. 4.5 г). Частота f_0 цього випромінювання визначається законом збереження енергії:

$$hf_0 = 2eU.$$

Це явище назвали нестационарним ефектом Джозефсона. Воно має обернений характер, тобто якщо опромінювати джозефсонівський перехід коливанням з деякою частотою f , то при збігу цієї частоти з характерною для даної напруги U частотою f_0 виникає резонансна взаємодія. Такий же резонанс настає при $f = f_0/n$, де n – ціле число, у результаті чого на вольт-амперній характеристиці (ВАХ) переходу з'являються особливості (рис. 4.6) у вигляді сходинок при напругах

$$U_{\text{Дж}} = n \frac{h}{2e} f_0,$$

де n – номер сходинок.

Величина $\frac{h}{2e}$ називається квантом магнітного потоку, обернена $\frac{2e}{h}$ – сталою Джозефсона.

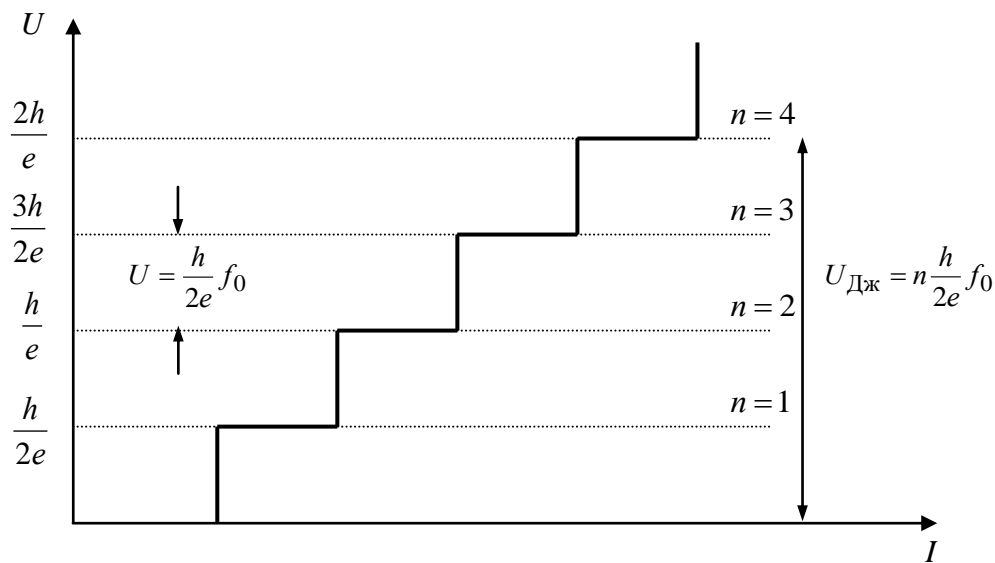


Рис. 4.6. Вольт-амперна характеристика джозефсонівського переходу

Оскільки частота в даний час може бути створена дуже стабільною і точно виміряна, теоретично досяжна точність відтворення напруги за допомогою ефекту Джозефсона при коректній апаратурній реалізації обмежується похибкою визначення $h/2e$.

4.4.2 Структурна схема еталона

На основі ефекту Джозефсона створено еталони одиниці постійної напруги – вольты в багатьох промислово розвинутих країнах. До складу перших еталонів входили кілька джозефсонівських контактів, які збуджувалися НВЧ-випромінюванням частотою 8...10 ГГц. Значення квантованої напруги становило при цьому 4...10 мВ. Оскільки за допомогою джозефсонівської напруги необхідно було калібрувати міри напруги (наприклад, нормальні елементи) з ЕРС близько 1 В, таке низьке значення відтвореної напруги змушувало включати до складу еталона 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 включають до себе кілька тисяч послідовно з'єднаних контактів Джозефсона. Такі матриці дозволяють відтворювати безпосередньо напругу в 1 В и більше при частоті $f_0 \sim 70$ ГГц.

Стабільні результати були отримані з контактами типу SIS (надпровідник – ізолятор – надпровідник) $Nb/Al_2O_3/Nb$, хоча роботи з їхнього удосконалення 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. 4.7.

Структуру сучасного джерела джоозефсонівської напруги в 1 вольт наведено на рис. 4.8.

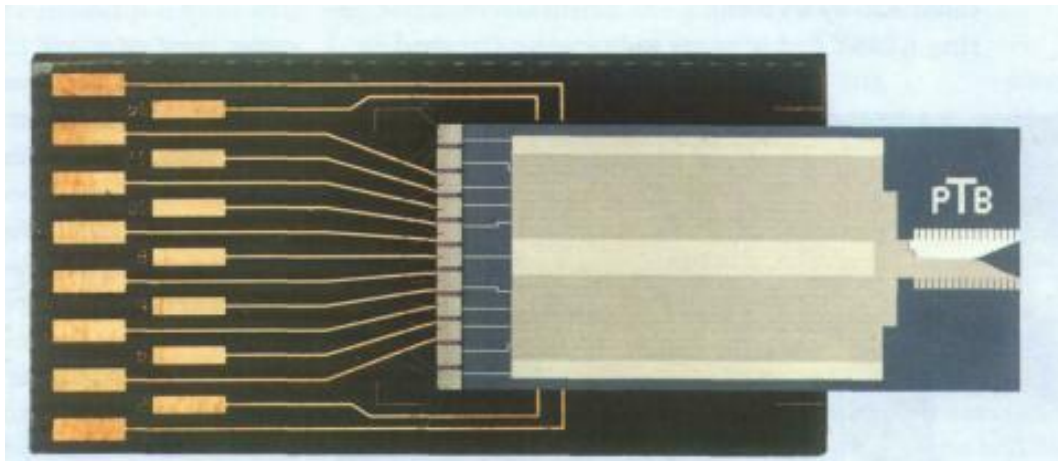


Рис. 4.7. Зовнішній вигляд матриці Джоозефсона (РТВ), розмір 17×10 мм

Кріозонд із матрицею контактів Джоозефсона (КД) розміщується в кріогенному середовищі (рідкий гелій), яке створене в посудині Дьюара. НВЧ-генератор з частотою порядку 70 ГГц опромінює матрицю КД. Частота цього генератора синхронізується джерелом еталонної частоти f_e за допомогою системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) і вимірюється електроннолічильним частотоміром (ЕЛЧ) з переносником частоти.

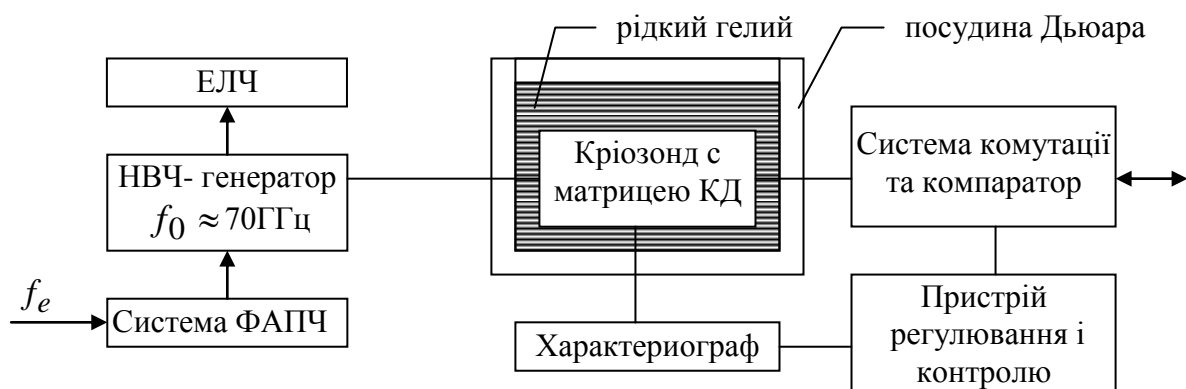


Рисунок 4.8 – Джерело джоозефсонівської напруги

Характериограф з осцилографічним індикатором служить для реєстрації східчастої вольт-амперної характеристики джоозефсонівського джерела, тобто наявності факту резонансної взаємодії й ефекту Джоозефсона.

Пристрій регулювання і контролю призначено для встановлення необхід-

них режимів і попереднього контролю відтвореної напруги (ЕРС), а також точного визначення номера сходинки ВАХ за допомогою цифрового вольтметра.

Система комутації і компарування необхідна для мінімізації термо-ЕРС, що виникає при переході від гелієвої (4,2 К) до кімнатної (290 К) температури, а також передачі значення ЕРС, відтвореної джозефсонівським джерелом, системі зберігання розміру одиниці.

Крім джерела джозефсонівської напруги, еталон повинний містити в собі також згадану вище систему зберігання одиниці і її передачі. Ця система складається з мір ЕРС і компараторів (рис. 4.9). В Україні і Росії як міри ЕРС використовуються насичені нормальні елементи (ННЕ) (група від 10 до 20 штук у спеціальному термостаті), хоча в ряді країн останнім часом перевага віддається твердотільним мірам ЕРС на прецизійних стабілітронах (діодах Зеннера). 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.

Основною вимогою до системи збереження еталона є довгострокова стабільність, а крім того – можливість транспортування для проведення взаємних звірень еталонів. Першій вимозі (при дотриманні необхідних умов зберігання) щонайкраще відповідає групова міра на ННЕ. Однак твердотільна міра (ТТМ) має безсумнівну перевагу перед ННЕ як транспортабельний еталон передавання.

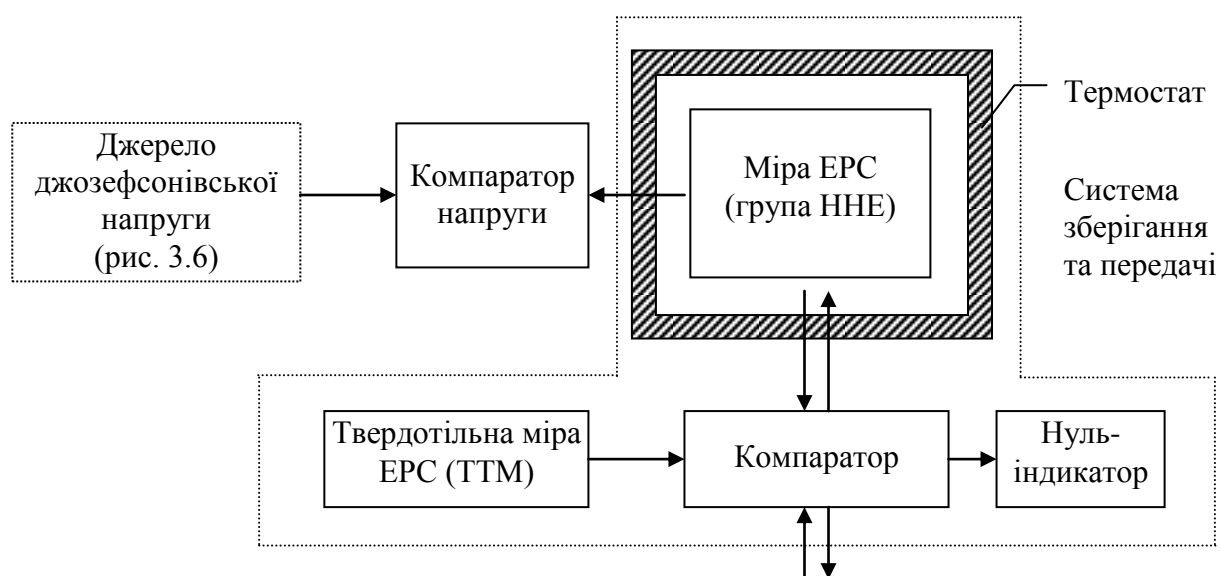


Рис. 4.9. Структурна схема системи зберігання і передачі одиниці ЕРС

Відзначимо також, що в структуру еталона входять дуже важливі додаткові пристрої і системи, що істотно впливають на його метрологічні характеристики: фільтри електричних і магнітних завад у складі криозонда, система екранування приміщення від зовнішніх електромагнітних перешкод, системи тер-

мостатування, заземлення, гідроізоляції, високоякісного енергопостачання.

Еталон одиниці ЕРС на квантовому ефекті Джозефсона в СРСР був створений у 1980 м (ВНИИМ) одним із перших у світі. Він містив у собі джозефсонівську міру напруги на чотирьох контактах, генератор НВЧ на клістріні із частотою близько 8,6 ГГц, стабілізований за частотою вторинного еталона частоти, резистивний компаратор для звірення напруги, відтвореної джозефсонівською мірою (близько 4 мВ), з ЕРС еталонних нормальних елементів (1,018...В).

У наступні роки еталон неодноразово модернізувався й удосконалювався. На цей час і Росія, і Україна створили сучасні еталони [28], в яких втілено останні досягнення в цій галузі (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Державний первинний еталон одиниці ЕРС

Так, до складу державного еталона України входять багатоелементні 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 постійної напруги, ЕОМ. Типові складові похибки відтворення одиниці напруги й оцінку їхніх значень в еталоні України наведено в табл. 4.2. (при напрузі 1 й 10 В, без урахування похибки визначення константи Джозефсона). Структурну схему державного еталона України наведено на рис. 4.11.

За своїми характеристиками еталони України знаходяться на світовому рівні.

Деякі країни створили також транспортабельний еталон на ефекті Джозефсона, що дозволяє проводити звірення еталонів різних країн. Зовнішній вигляд транспортабельного еталонна МБМВ приведено на рис. 4.12.

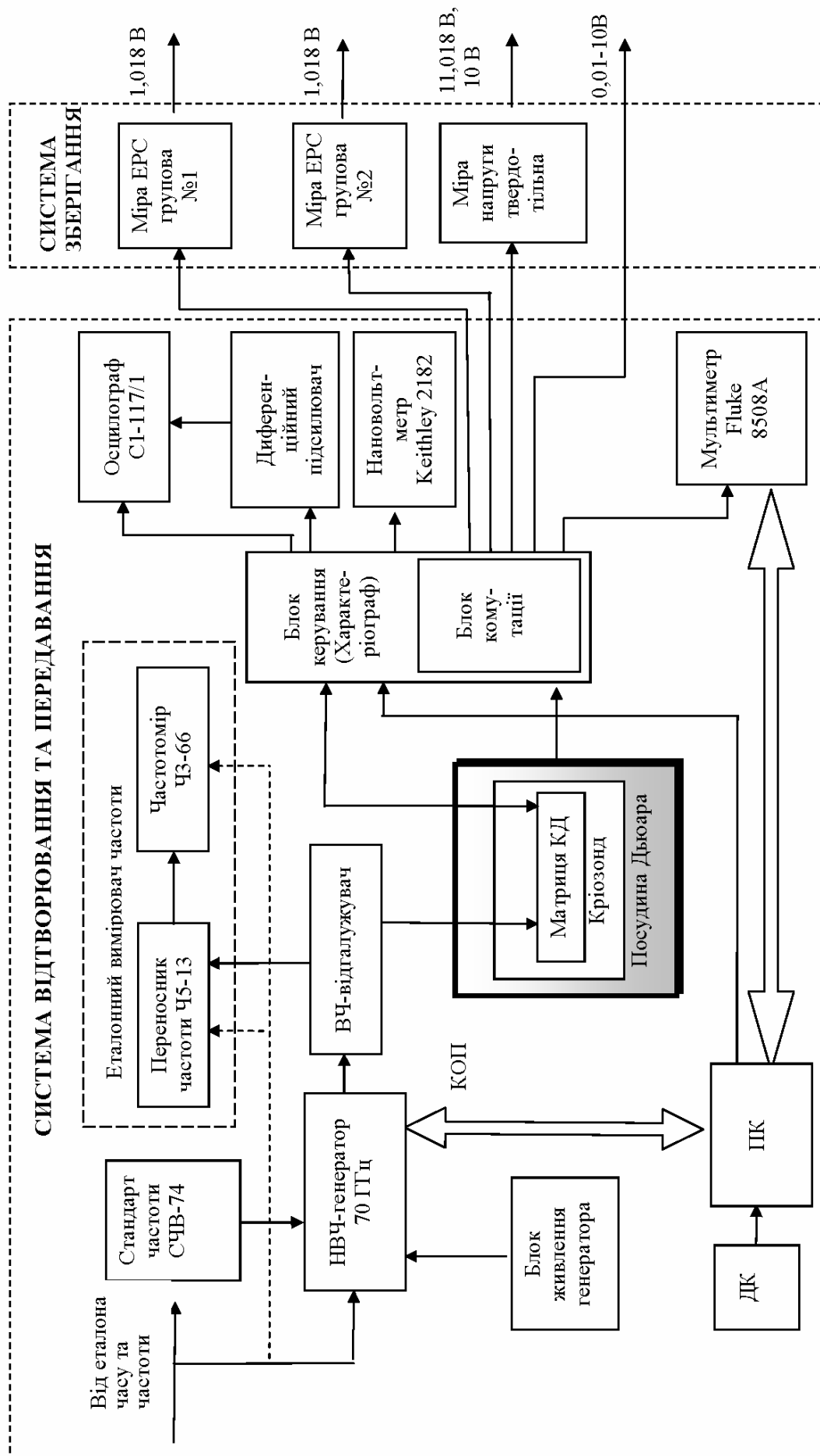


Рис. 4.11. Структурна схема первинного еталона України одиниці ЕРС та сталой напруги

Складові похибок (невизначеності) еталона України

Складові відносної похибки (невизначеності)	Значення похибки		Стандартна невизначеність	
	S_i	θ_i	Тип	Значення
Похибка визначення частоти опромінювання	–	$1 \cdot 10^{-10}$	B	$0,6 \cdot 10^{-10}$
Похибка через нестабільність частоти	$1 \cdot 10^{-11}$	–	A	$1 \cdot 10^{-11}$
Похибка через нестабільність термо-ЕРС	$5 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $5 \cdot 10^{-10}$ (U=10 В)	–	A	$5 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $5 \cdot 10^{-10}$ (U=10 В)
Похибка через наявність струму витоку	–	$6 \cdot 10^{-9}$	B	$3,5 \cdot 10^{-9}$
Сумарна оцінка	$5 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $5 \cdot 10^{-10}$ (U=10 В)	$7 \cdot 10^{-9}$		$6 \cdot 10^{-9}$ (U=1 В) $3,5 \cdot 10^{-10}$ (U=10 В)



Рис. 4.12. Транспортбельний еталон вольт на ефекті Джозефсона (МБМВ)

Як вторинні еталони застосовуються стаціонарні й транспортабельні установки на ефекті Джозефсона, а також еталонні групові міри ЕРС і постійної напруги на основі ННЕ і твердотільних мір на стабілітронах.

У світовій метрологічній практиці як вторинні еталони постійної напруги найбільш широке поширення одержали згадані вище твердотільні міри на прецизійних стабілітронах, що фактично витиснули нормальні елементи. Цілий ряд великих фірм (“Wavetek”, “Fluke”, “Hewlett-Packard”) випускають портативні ТТМ (рис. 4.13), що мають такі типові характеристики:

нестабільність (за рік)	$(1 - 3) \cdot 10^{-6}$;
СКЗ шумової напруги номінальні напруги	$(0,03 - 0,2) \cdot 10^{-6}$; 1 і 10 В.

За шумовими характеристиками ТТМ поступаються нормальним елементам. Тому для підвищення точності вимірювань використовують спеціальні методи виконання вимірювань на основі методів математичної статистики і математичного моделювання.



Рис. 4.13. Портативна твердотільна міра напруги МН-3

4.5 Еталон ома на основі квантового ефекту Холла

4.5.1 Фізична суть ефекту Холла

Цей ефект був відкритий у 1980 р. німецьким вченим Клаусом фон-Клітцингом [33], названий ним “квантовим ефектом Холла” (на честь видатного фізика Е. Холла). Суть його полягає в тому, що в спеціальних структурах типу метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) при температурі рідкого гелію (4.2 К) й у сильному магнітному полі (6-12 Тл) електричний опір приймає строго фіксовані (дискретні) значення (4.3):

$$R_X = \frac{h}{e^2 m}$$

де $\frac{h}{e^2}$ – константа Клітцинга $R_K = 25812,807 \text{ Ом}$; $m = 1, 2, 3 \dots$ – ціле число (номер сходинки).

Схему холлівської МДН-структури наведено на рис. 4.12.

Якщо на металеву пластинку подається позитивна напруга U_B , тоді частина електронів із кремнієвого напівпровідника Si підтягнеться до границі діелектрика SiO_2 і збереться в тонкому шарі – каналі, обмеженому на рис. 4.14 пунктиром, оскільки діелектрик для електронів є непроникливим, а назад до напівпровідника їм не дає повернутися сила притягання до металеві пластини.

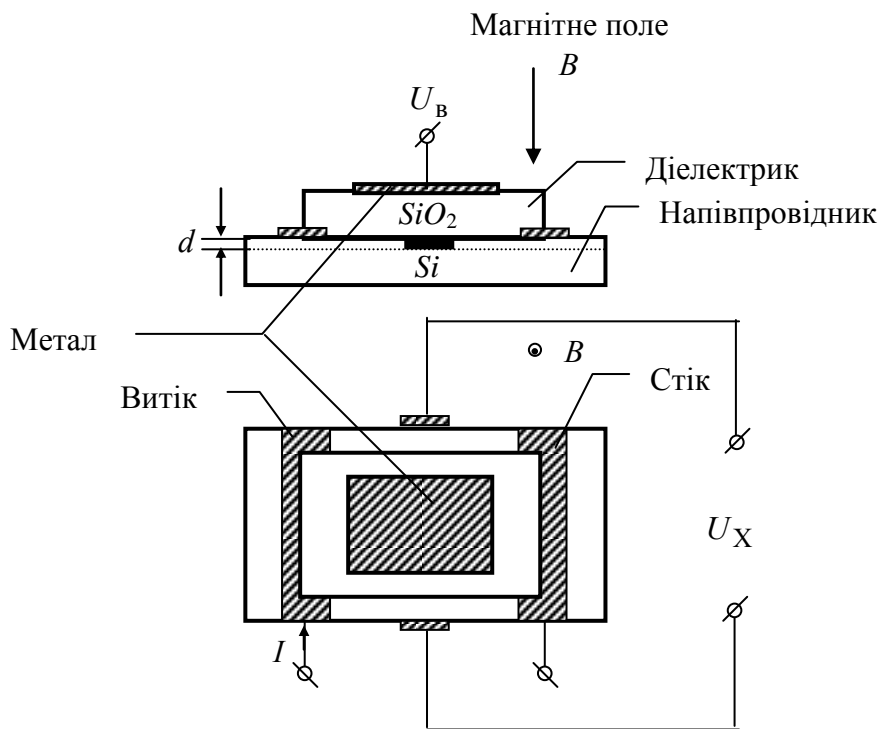


Рис. 4.14. Холлівська структура типу метал – діелектрик – напівпровідник

Замкнені в каналі товщиною d електрони, відповідно до законів квантової механіки, будуть займати найнижчий з можливих дискретних енергетичних рівнів, що відповідають руху поперек шару, а їхні хвильові функції будуть “розмазані” по товщині каналу. Якщо подати напругу на електроди “витік-стік”, то між ними потече струм I . Якщо, крім того, прикласти магнітне поле B перпендикулярно площині каналу, то електрони, згинаючи свої траєкторії в полі B , почнуть зосереджуватися з боків структур, поки різниця потенціалів, що виникла між холлівськими контактами, не перешкодить їх подальшому накопиченню. Це класичний ефект Холла, який характеризується холлівським опором $R_X = U_X / I$. Як показано в курсі загальної фізики, величина R_X обернено пропорційна щільності електронів ρ_e у каналі (рис. 4.15, крива а).

Однак, при врахуванні квантового характеру руху електронів у магнітному полі виникає інша ситуація. Відповідно до квантової механіки, енергія електронів у площині шару може приймати тільки дискретні значення. Таким чином, рух електрона виявляється квантованим за всіма трьома координатами. Наслідком цього є наявність на залежності R_X від щільності електронів у шарі ρ_e плоских ділянок – плато з квантованими значеннями відповідно до наведеної вище формули (рис. 4.15, крива б). Це і є квантовий ефект Холла. На практиці значення ρ_e регулюють, змінюючи U_B [13, 28].

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

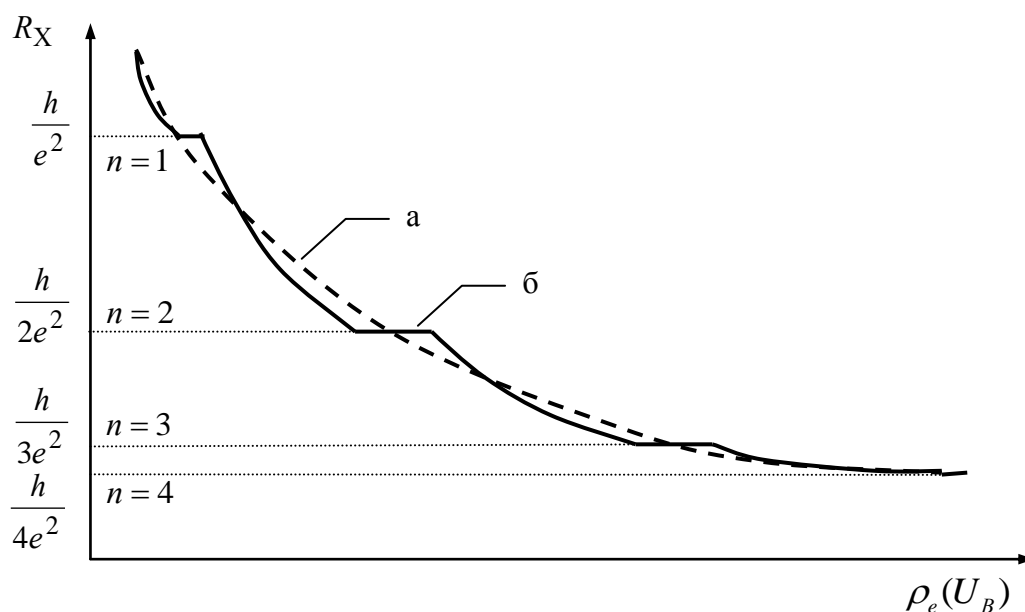


Рисунок 4.15 – Залежність холівського опору від густини електронів у каналі

4.5.2 Структурна схема еталона

Установка для відтворення ефекту Холла містить у собі кріостат (герметизована ємність з рідким гелієм), у якому в спеціальному кріозонді знаходиться холівська структура, а також надпровідний соленоїд, що створює магнітне поле (рис. 4.16).

Важливим питанням є здійснення передачі розміру опору холівської структури реальній еталонній мірі опору R_e , що знаходиться при нормальній температурі, як правило, в окремому термостаті. Номінальне значення опору R_e при цьому дорівнює холівському $((R_X)_{n=2}$ або $(R_X)_{n=4}$). Вимірювальна схема містить два контури з одним джерелом стабільного струму. У перший контур включено холівську структуру, у другий – міра R_e (див. рис. 4.16). Для порівняння R_e і R_X застосовується, як правило, потенціометрична схема з високочутливим нуль-індикатором. Керування, контроль і обробка інформації в сучасних етало-

нах здійснюються з застосуванням ЕОМ.

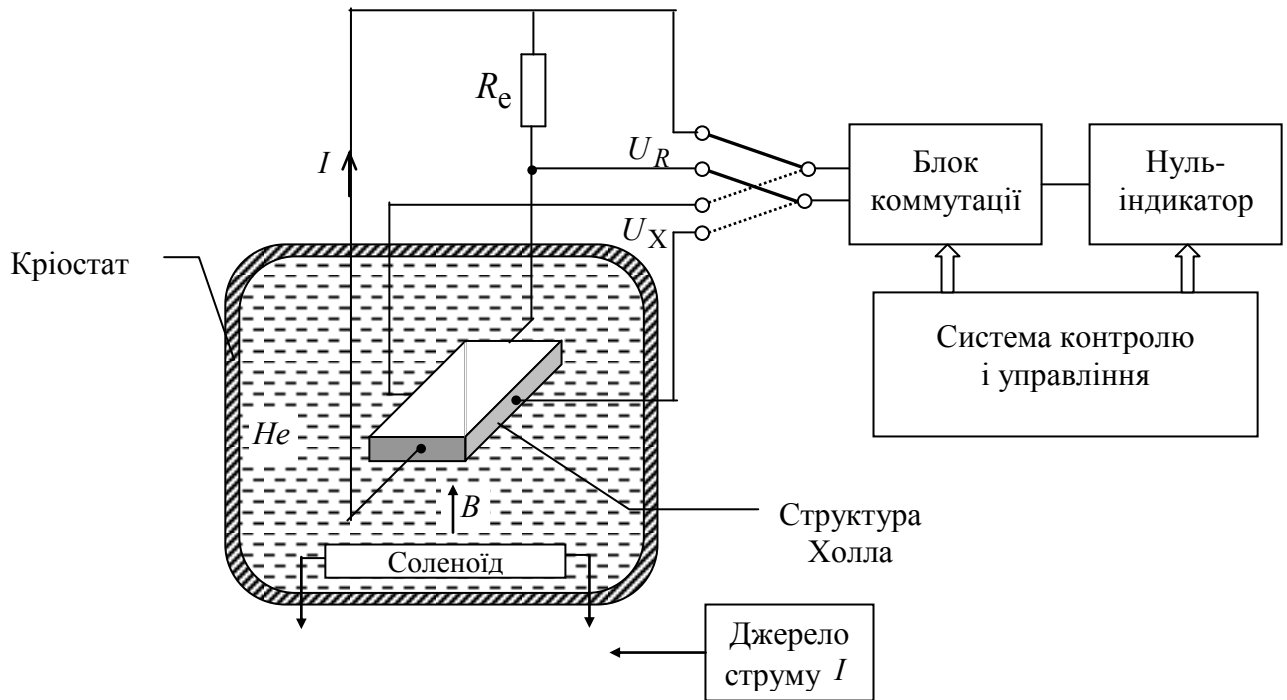


Рис. 4.16. Структурна схема установки для реалізації квантового ефекту Холла

Крім установки для відтворення квантового ефекту Холла первинний еталон одиниці електричного опору містить у собі (рис. 4.17)



Рис. 4.17. Структурна схема первинного еталона електричного опору

- апаратуру для зберігання одиниці електричного опору, яка складається з групи прецизійних мір електричного опору одного чи декількох номіналів і перехідних мір, що дозволяють проводити взаємні звірення мір різних номіналів;
- міст-компаратор для передачі розміру одиниці між пристроями первинного еталона і підпорядкованим еталоном;
- набір перехідних мір для передачі розміру одиниці в діапазоні від 10^{-3} до 10^9 Ом.

Типові метрологічні характеристики еталона опору на ефекті Холла (на прикладі еталона Росії):

номінальне значення відтвореного опору, Ом	12906,4035; 6453,20175;
діапазон, у якому передається розмір одиниці, Ом	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^9$;
НСП відтворення ($p = 0,99$)	$4,5 \cdot 10^{-8}$;
СКВ випадкової похибки	$2,5 \cdot 10^{-8}$.

Загальний вигляд апаратури первинного еталона наведено на рис. 4.18.



Рис. 4.18. Державний первинний еталон одиниці електричного опору (ВНИИМ)

Розглянемо більш докладно апаратуру зберігання розміру ома. Прецизійні міри електричного опору являють собою спеціальні котушки, в яких прийнято ряд конструктивних і технологічних заходів для забезпечення високої стабіль-

ності зберігання розміру одиниці опору.

На рис. 4.19 наведено конструкцію типового еталонного резистора. Дротовий резистор зазвичай виконується зі сплаву типу манганін (Ni – 4 %, Cu – 84 %, Mn – 12 %), який має питомий опір $46 \cdot 10^{-6}$ Ом/см, низький тепловий коефіцієнт опору (ТКО) $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$ і термо-ЕРС з міддю не більше 1 мкВ/ $^\circ\text{C}$. Для великих значень опору іноді використовується сплав Evanohm (Ni – 74,5 %, Cr – 20 %, решта Al, Fe або Cu). Він має питомий опір $133 \cdot 10^{-6}$ Ом/см, ТКО $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$ і термо-ЕРС з міддю не більше 2 мкВ/ $^\circ\text{C}$.

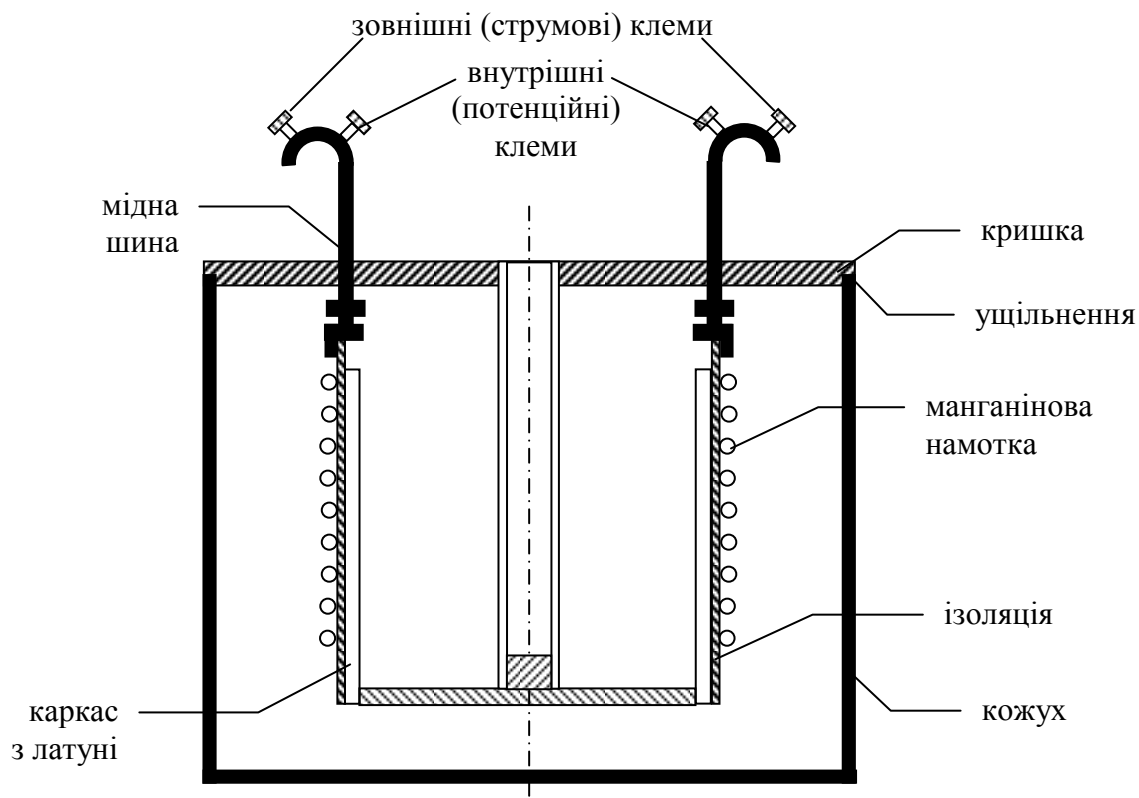


Рис. 4.19. Конструкція типового еталонного резистора

Котушка опору може бути занурена в масло для температурної стабілізації. Вона поміщується в запаяний, захищений від вологи контейнер.

Для зниження похибок через контактні опори в клеммах використовуються чотирьохполюсні конструкції, в яких струм тече поміж двома зовнішніми клемми, а напруга вимірюється (фіксується) між двома внутрішніми клемми.

4.5.3 Про можливості атестації мір опору за допомогою еталонної ємності

Оскільки створення еталона на квантовому ефекті Холла – задача достатньо складне, існує можливість калібровки (атестації) мір електричного опору за допомогою еталонної ємності, відтвореної згаданим вище розрахунковим конденсатором.

Для цього необхідно мати вимірювальну апаратуру, за допомогою якої можна було б реалізувати рівняння вимірювань

$$R = K \frac{1}{\omega_e C_e},$$

де R – активний опір досліджуваного резистора; ω_e – еталонна частота; C_e – ємність еталонного конденсатора; K – безрозмірний коефіцієнт пропорційності (стала моста-компаратора).

Такою апаратурою є так звані квадратурні мости змінного струму, які дозволяють компарувати або вимірювати відношення двох незалежних напруг, що знаходяться в квадратурі (зсунуті за фазою на 90°).

Апаратуру калібрування еталонного резистора 1 Ом наведено на рис. 4.20. Усі відомі розрахункові конденсатори типу «Томпсона-Лампарда-Клотье» відтворюють ємність у діапазоні 0,2 – 0,6 пФ, за допомогою якої з використанням еталонної частоти поблизу 1500 Гц і моста змінного струму калібрується конденсатор 10 пФ (докладніше про це буде сказано при розгляді еталона ємності).

Далі, за допомогою досить складної системи передавання, що включає до себе квадратурний, ємнісний та резисторний мости, подільник та перехідні міри, калібрується опір 1 Ом, який є основою апаратури зберігання одиниці електричного опору.

Первинні еталони передових країн включають до свого складу як апаратуру для відтворення одиниці опору за допомогою ефекту Холла, так і апаратуру порівняння з розрахунковим конденсатором.

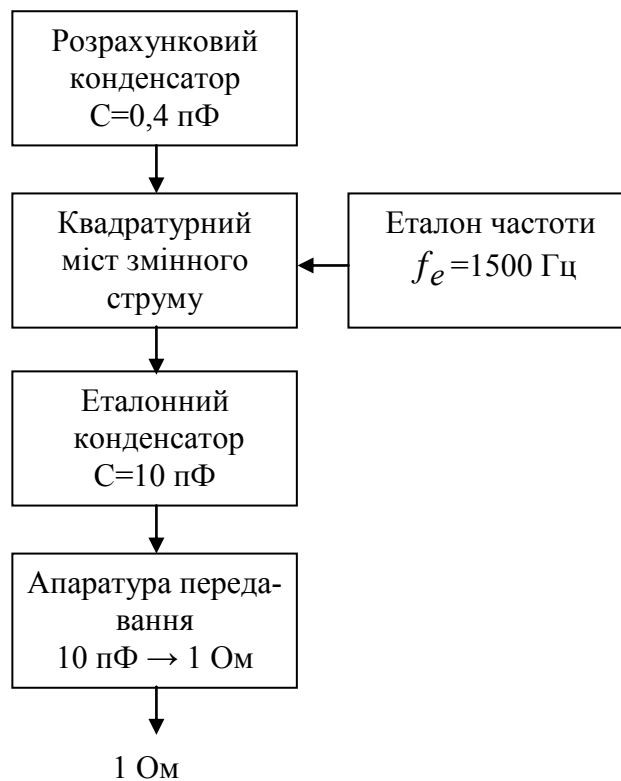


Рис. 4.20. Схема калібрування еталонного резистора 1 Ом за допомогою розрахункового конденсатора

Окремо слід сказати про еталонні міри електричного опору, призначені для кіл змінного струму.

Оскільки еквівалентна схема резистора включає до себе паразитну ємність та індуктивність, очевидно, що діючий опір залежить від частоти.

Резистори, призначені для кіл змінного струму, для зниження залежності від частоти повинні мати малий поверхневий ефект, а також мінімальні реактивності (постійну частоту). Для цього використовують дріт з тонких жил (літцендрат) і спеціальні види намотки, наприклад, біфілярну спіраль (типу Ертона-Пері). Існують також безкорпусні ВЧ-резистори, виготовлені за спеціальною технологією, які можна вважати практично безреактивними до частот в кілька гігагерц.

В метрологічних розрахунках часто необхідно знати точне значення опору на робочих частотах. Такі вимірювання можуть бути проведені з використанням еталонної ємності, синтезатора частоти і квадратурного моста-компаратора, про який сказано вище.

4.6 Еталон одиниці магнітної індукції на ефекті ядерного магнітного резонансу

Ефект ядерного магнітного резонансу відкрито у 1946 р. Блохом і Парселем, суть його полягає в наступному. Ядро атома, володіючи механічним і магнітним моментом, здійснює у магнітному полі прецесійний рух, аналогічний руху “вовчка” у полі тяжіння Землі. Частота прецесії f атомного ядра робочої речовини визначається магнітно-механічними властивостями ядра цієї речовини і значенням напруженості магнітного поля H , у якому воно знаходиться

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

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

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

З приведеної формули виходить, що $B = \frac{2\pi f}{\gamma}$, тобто якщо гіромагнітне відношення ядра застосовуваної речовини відомо, то задача зводиться до вимірювання частоти прецесії.

Установлено, що найбільш потужний сигнал ЯМР має місце при використанні ядра атома водню, тобто протона, гіромагнітне відношення якого γ_p є однією із фундаментальних фізичних сталих і на підставі обробки визначень ряду країн встановлено КОДАТА рівним $(26752, 2128 \pm 0,0081) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ Тл}^{-1}$.

Принцип побудови еталона в діапазоні від 0,05 до 2 Тл (область найбільшого поширення засобів вимірювань магнітної індукції) пояснюється за допомогою спрощеної структурної схеми, наведеної на рис. 4.21 [35].

Використовується резонанс протонів у воді (водяному розчині $FeCl_3$). Розчин знаходиться в ампулі, на якій намотані ВЧ котушки (рис. 4.21). Ампула поміщається в постійне магнітне поле між полюсами електромагніта (у робочому зазорі). Вісь котушки повинна бути перпендикулярна вектору вимірюваної індукції магнітного поля.

На котушку подається напруга від ВЧ-генератора, внаслідок чого навколо зразка створюється змінне магнітне поле. 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. Частота ВЧ-генератора в момент ЯМР вимірюється електронно-лічильним частотоміром (ЕЛЧ), а відтворене значення магнітної індукції визначається зі співвідношення $B = 2\pi f / \gamma_p$. Регулювання значення магнітної індукції здійснюється за допомогою блока живлення шляхом регулювання напруги на електромагнітах*.

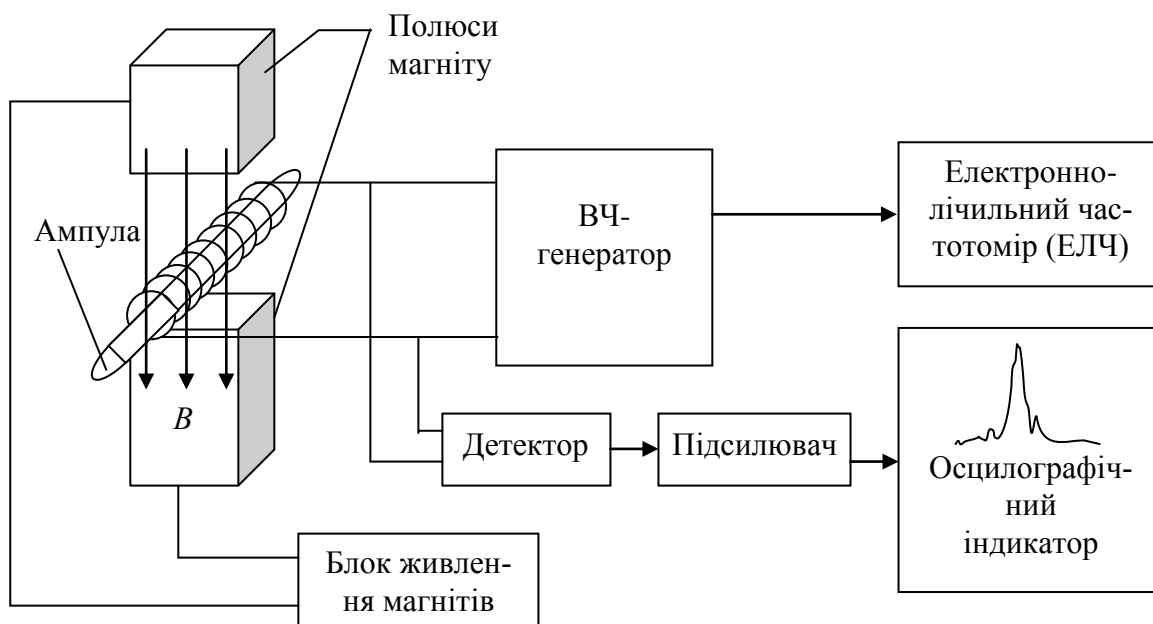


Рисунок 4.21 – Структурна схема еталона магнітної індукції

Реальна схема еталона значно складніше. Для забезпечення необхідних метрологічних характеристик еталон містить у собі ряд систем:

- систему забезпечення однорідного стабільного магнітного поля в робочому зазорі магніта;
- систему стабілізації частоти ВЧ-генератора;
- систему керування роботою еталона й обробки результатів вимірювань.

Основними складовими невиключеної систематичної похибки еталона є:

* При відтворенні значень магнітної індукції від 0,05 до 2 Тл частота ВЧ-генератора повинна регулюватися в діапазоні від 2,2 до 86 МГц.

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

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

Перший з них (рис. 4.22) має такі метрологічні характеристики [35]:

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})	$< 3 \cdot 10^{-6}$.

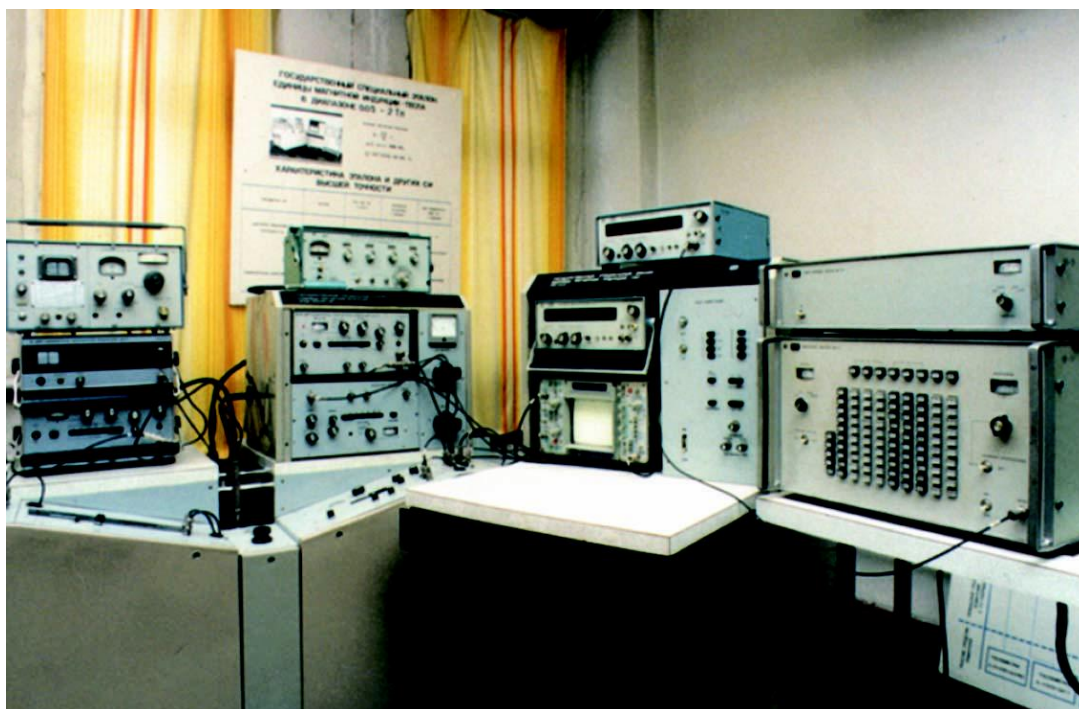


Рис. 4.22. Державний еталон магнітної індукції у діапазоні від 0,05 до 2 Тл

Передача розміру одиниці від державного 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 [23]. 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 рішення ряду науково-технічних задач з технічного використання надпровідності. Зокрема, з 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 відтворених значень 1-10 Тл, НСП $\theta_0 < 1 \cdot 10^{-5}$; СКВ $S_0 < 1 \cdot 10^{-6}$.

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. у ВНИИМ [28]. Головним елементом еталона є еталонна котушка, через яку пропускається електричний струм (рис. 4.23). Магнітна індукція визначається відповідно до виразу

$$B = K_B I + \Delta B, \quad (4.4)$$

де K_B – стала струмової котушки за магнітною індукцією, яка визначається розрахунком 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:

вищезгадану 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.



Рис. 4.23. Блок еталонної струмової котушки

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. 4.3.

Таблиця 4.3

Метрологічні характеристики комплексного еталона одиниць магнітних величин Росії

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	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-6}$

Розмір одиниці магнітної індукції, відтворений даним еталонем, погоджується з одиницями, відтвореними іншими еталонами, через гіромагнітне відношення протона.

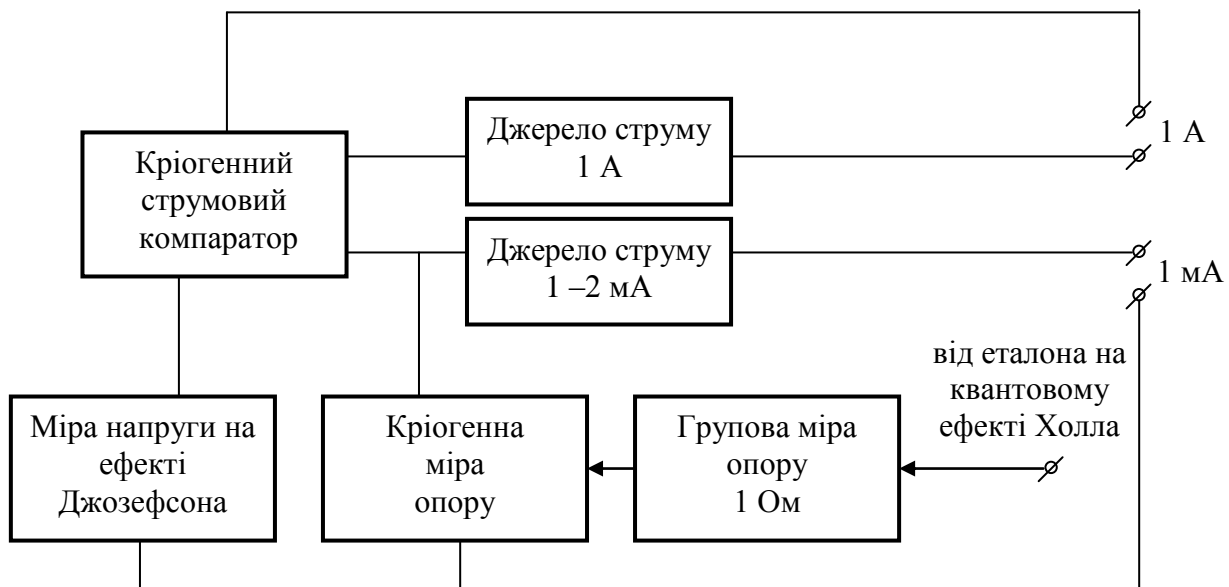
4.7 Еталон ампера на основі квантових ефектів

Вище було сказано про можливості створення еталона ампера на ефекті одноелектронного тунелювання, але практична реалізація відповідної апаратури поки далека від свого завершення. Але існує можливість відтворення ампера

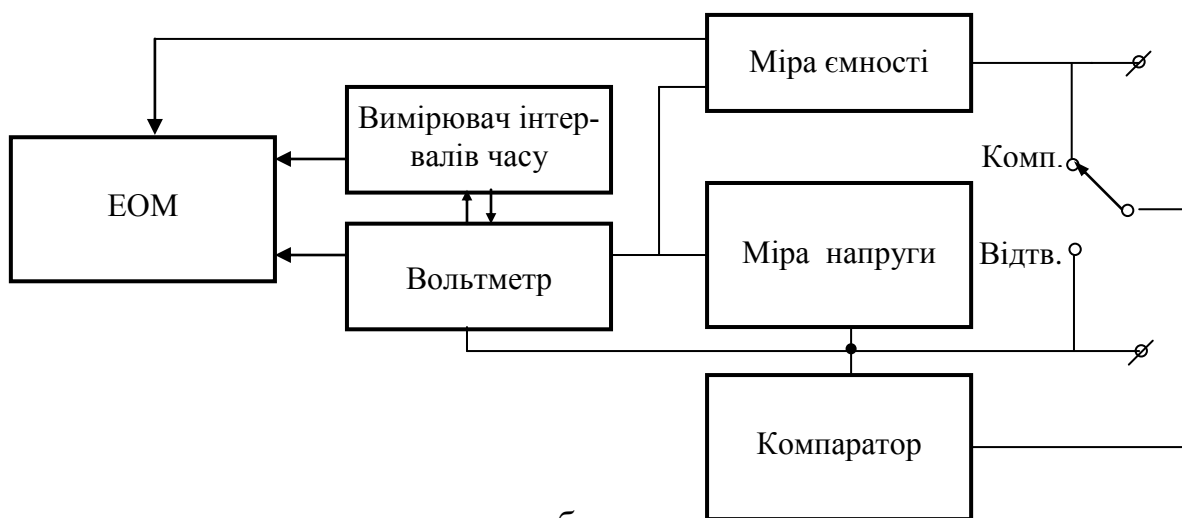
на основі квантового вольта, квантового ома і закону Ома. Кілька країн створили відповідну апаратуру, в тому числі Росія.

Розглянемо створений у такий спосіб еталон Росії. Еталон складається з 2-х 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 [28, 44].

Комплекс для відтворення сили струму (рис. 4.24,а) 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* (рис. 4.25). Комплекс являє собою багатозначну міру постійного струму з номінальними значеннями 1 мА і 1 А.



а



б

* НКВІД – надпровідний квантовий інтерференційний детектор – високочутливий прилад на одному з різновидів ефекту Джозефсона

Рис. 4.24. Структурна схема еталона одиниці сили струму Росії



Рис. 4.25. Фрагмент апаратури еталона ампера

Значення відтвореного струму визначається зі співвідношення:

$$I = nK_{\text{Дж}}^{-1}mR_{\text{К}}^{-1}f ,$$

де n , m – цілі числа; f – частота опромінення; $K_{\text{Дж}}$ і $R_{\text{К}}$ – сталі Джозефсона і Клітцинга, відповідно.

Основними елементами другого комплексу (рис. 4.24,б), що відтворює силу постійного струму в діапазоні $10^{-16} - 10^{-9}$ А, 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. Тоді $I_x = I_0$.

Невиключена систематична похибка відтворення сили струму в діапазоні від $1 \cdot 10^{-3}$ до 1 А становить $2 \cdot 10^{-7}$ при СКВ випадкової похибки $5 \cdot 10^{-8}$

4.8 Висновок

Методологія використання квантових ефектів у метрології продовжує активно розвиватися. Удосконалюється також техніка й технологія побудови відповідних еталонів.

Одним із напрямків подальшого вдосконалення є підвищення точності визначення фізичних сталих і їхнє узгодження. Як уже говорилося, цю роботу ве-

дуть найбільш розвинуті центри метрології: NIST (США), NPL (Англія), PTB (Німеччина), а також ВНИИМ (Росія). Уточнення ФФС важливе не тільки для удосконалювання квантових еталонів, але й для розвитку системи одиниць у цілому, а також для багатьох напрямків наукових досліджень.

Іншим важливим напрямком є дослідження в галузі технологій виготовлення надпровідних структур, за допомогою яких реалізуються квантові ефекти. Так, для реалізації ефекту Джозефсона, крім названих вище SIS-матриць, розроблено матриці на структурах “надпровідник – нормальний метал – надпровідник” (SNS) і “надпровідник – ізолятор – нормальний метал – ізолятор – надпровідник” (SINIS), що мають особливості в характеристиках. Зокрема, сьогодні, коли стоїть питання про використання ефекту Джозефсона для вимірювання змінної напруги, важливою технологічною задачею є створення програмованої матриці для роботи в динамічному режимі. Подібні технологічні проблеми стоять і в плані вдосконалення холівських МДН-структур і структур для реалізації ефекту одноелектронного тунелювання.

Нарешті, у третій напрямок варто виділити вдосконалення всієї інфраструктури квантових еталонів: магнітних систем еталонів на ефектах Холла і ЯМР, криогенної техніки (включаючи використання високотемпературної надпровідності), НВЧ-генераторів, зберігачів одиниць (твердотільних мір напруги і мір опору). Одною з гілок цього напрямку є подальше вдосконалення мобільних квантових еталонів.

Контрольні питання

1. Назвіть найбільш поширені похідні величини, які використовуються в електриці, і їх одиниці.
2. Які квантові ефекти знайшли використання для створення первинних еталонів електричних одиниць?
3. Які еталони складають основу системи еталонів в галузі електрорадіомірювань?
4. В чому полягає суть ефекту Джозефсона, яку одиницю дозволяє відтворити використання цього ефекту?
5. Які основні пристрої входять до структури первинного еталона одиниці електрорушійної сили на ефекті Джозефсона?
6. В чому полягає суть квантового ефекта Холла, яку одиницю дозволяє відтворити використання цього ефекту?
7. Які основні пристрої входять до структури первинного еталона електричного опору на квантовому ефекті Холла?
8. Як можна відтворити одиницю електричного опору за допомогою міри ємності?
9. В чому полягає суть ефекту ядерного магнітного резонансу, яку одиницю можна відтворити з використанням цього ефекту?
10. Які пристрої входять до структури первинного еталона на ефекті ЯМР?
11. Які ефекти використовуються для створення “квантового” еталона ампера?

5 ЕТАЛОНИ ОДИНИЦЬ НАПРУГИ І СИЛИ ЗМІННОГО СТРУМУ

5.1 Еталони одиниці напруги змінного струму

5.1.1 Параметри напруги змінного струму

Для характеристики напруги змінного струму використовуються такі параметри:

пікове значення U_m (для квазігармонічних коливань – амплітудне) – найбільше миттєве значення напруги $u(t)$ за час вимірювання T (чи за період T):

$$U_m = \max|u(t)|, t \in [t_0; t_0 + T]; \quad (5.1)$$

середнє значення U_0 за час вимірювання T (чи за період T) – постійна складова напруги $u(t)$:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt; \quad (5.2)$$

середньовипрямлене значення (СВЗ) – середнє значення абсолютного значення напруги:

$$U_{\text{СВ}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |u(t)| dt; \quad (5.3)$$

середньоквадратичне значення (СКЗ)* – позитивний корінь квадратний із середнього значення квадрата напруги:

$$U_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) dt}. \quad (5.4)$$

Ці параметри взаємопов'язані. Для чисто гармонічних коливань цей зв'язок виражається відомими співвідношеннями:

$$U_0 = 0; \quad U_m = \sqrt{2}U_{\text{СК}} = \frac{\pi}{2}U_{\text{СВ}}; \quad U_{\text{СВ}} = \frac{2}{\pi}U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_{\text{СК}}; \\ U_{\text{СК}} = \frac{1}{\sqrt{2}}U_m = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_{\text{СВ}}. \quad (5.5)$$

Найбільш універсальним та інформативним параметром змінної напруги є СКЗ. Вимогу градування показань вольтметрів у СКЗ офіційно закріплено в нормативних документах, зокрема, Росії й України. Тому, коли говорять про еталонування напруги змінного струму, мають на увазі саме середньоквадратичне значення.

* У літературі часто зустрічаються синоніми СКЗ – *діюче, ефективне* значення.

5.1.2 Основні методи точного вимірювання (відтворення) напруги змінного струму

Існує кілька методів точного вимірювання СКЗ змінної напруги. Перший ґрунтується на дискретизації сигналу, вимірюванні миттєвих значень з наступною цифровою обробкою й обчисленні за формулою (5.4). У цьому напрямку в останні роки досягнуто високі результати навіть у серійних приладах, наприклад, у HP3458A (фірма “Hewlett-Packard”, США), де найменша похибка не перевищує 0,01%.

Другий, придатний для чисто гармонічного чи іншого сигналу з точно відомою формою, полягає у вимірюванні амплітуди змінної напруги і наступному перерахуванні в СКЗ. Цей спосіб застосовується в компенсаційних вольтметрах, де в припущенні синусоїдальності напруги обчислюється СКЗ за формулою (5.5)

$$U_{ск} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m .$$

Третій базується на компаруванні теплових енергій (потужностей) при поданні на термоперетворювач вимірюваної змінної і відомої постійної напруг [36].

Перші два способи мають ряд відомих недоліків і характерних джерел похибок, що обмежують їхню точність і можливості використання в еталонних засобах, тому, не зупиняючись на них більш докладно, відзначимо, що найбільше поширення для точних вимірювань параметрів інтенсивності випромінювання будь-якого типу одержав метод теплового компарування. Відповідно до закону збереження енергії при повному поглинанні однакової кількості виділеного тепла відповідають однаковим енергіям незалежно від виду чи частоти випромінювання. На основі цього закону порівнюється енергія змінного струму з енергією постійного струму. Метод забезпечує єдність одиниць напруги, струму, потужності при різних довжинах хвиль і їх прив'язку до тих же одиниць на постійному струмі. Параметри постійного струму, зокрема, напругу, визначають з необхідною точністю на базі ефекту Джозефсона, розглянутого вище.

Діапазон частот, у якому створюють еталони одиниці змінної напруги, становить від одиниць герц до 2-3 ГГц (вище цих частот вимірюють потужність). І хоча в усьому діапазоні цих частот використовується метод теплового компарування, його апаратурна реалізація в різних частотних піддіапазонах суттєво відрізняється. Так, у більшості еталонів у діапазоні до ~ 100 кГц використовуються багатоелементні термопари, на більш високих частотах і приблизно до 30 МГц найкращі результати одержано з використанням одноелементних вакуумних безконтактних термоперетворювачів (ТП). 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 в якості навантаження ТП безреактивного резистора (рис. 5.1). Існує також варіант методу теплового компарування, який полягає у вимірюванні ВЧ-потужності на відомому імпедансі і обчисленні ВЧ-напруги.

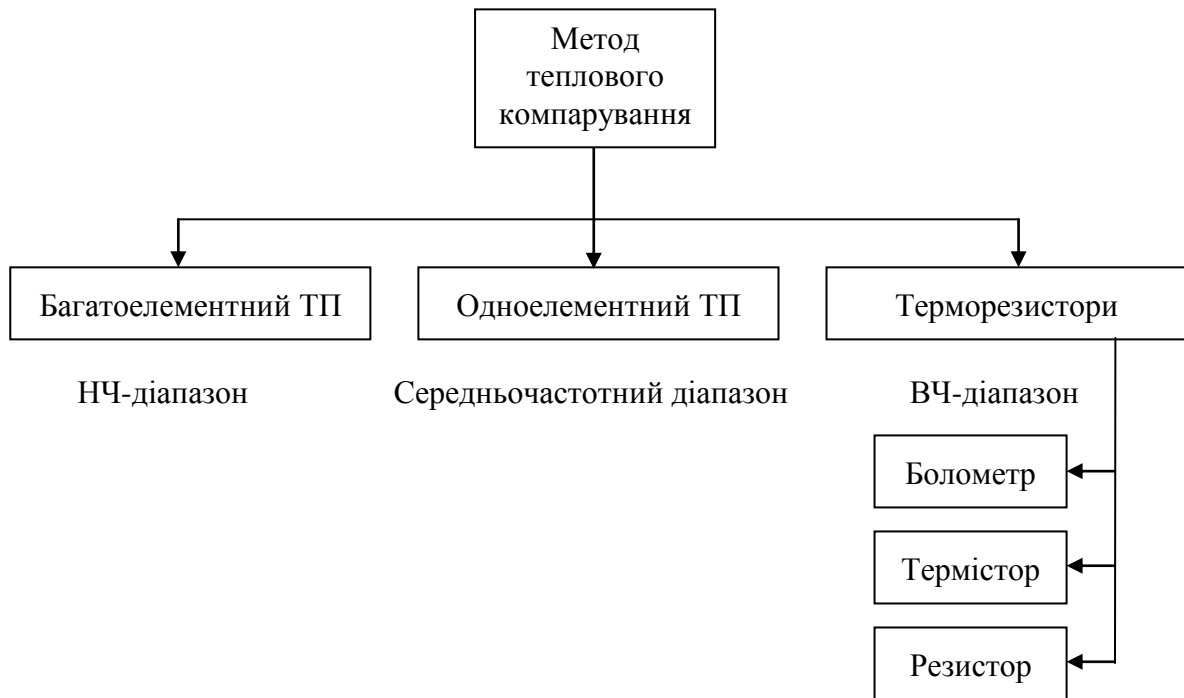


Рис. 5.1. Реалізація методу теплового компарування

Відзначимо, що динамічні діапазони відтворення змінної напруги в різних частотних піддіапазонах також суттєво відрізняються, що визначається як характеристиками засобів вимірювання напруги, так і науково-технічними можливостями їх реалізації. Аналіз створених у різних країнах еталонів дає такі орієнтовні значення відтворюваної еталонною напруги U в залежності від частоти f :

$U = 0,1 - 1000 \text{ В}$	при $f = 10 \text{ Гц} - 1000 \text{ кГц}$
$0,1 - 30 \text{ В}$	при $f = 100 \text{ кГц} - 1 \text{ МГц}$
$0,1 - 20 \text{ В}$	при $f = 1 - 30 \text{ МГц}$
$0,1 - 3 \text{ В}$	при $f = 30 - 100 \text{ МГц}$
$0,1 - 1 \text{ В}$	при $f = 100 \text{ МГц} - 1 (3) \text{ ГГц}$.

Наведені вище відомості щодо конструкцій термоперетворювачів і динамічних діапазонів ілюструються на рис. 5.2.

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, трьома еталонами, які працюють у піддіапазонах: $10 \text{ Гц} - 1 \text{ МГц}$; $1 - 30 \text{ МГц}$; $30 \text{ МГц} - 1(3) \text{ ГГц}$ (Німеччина, США, Великобританія). У СРСР у свій час були створені державні еталони в двох піддіапазонах: $20 \text{ Гц} - 30 \text{ МГц}$; $30 \text{ МГц} - 3 \text{ ГГц}$.

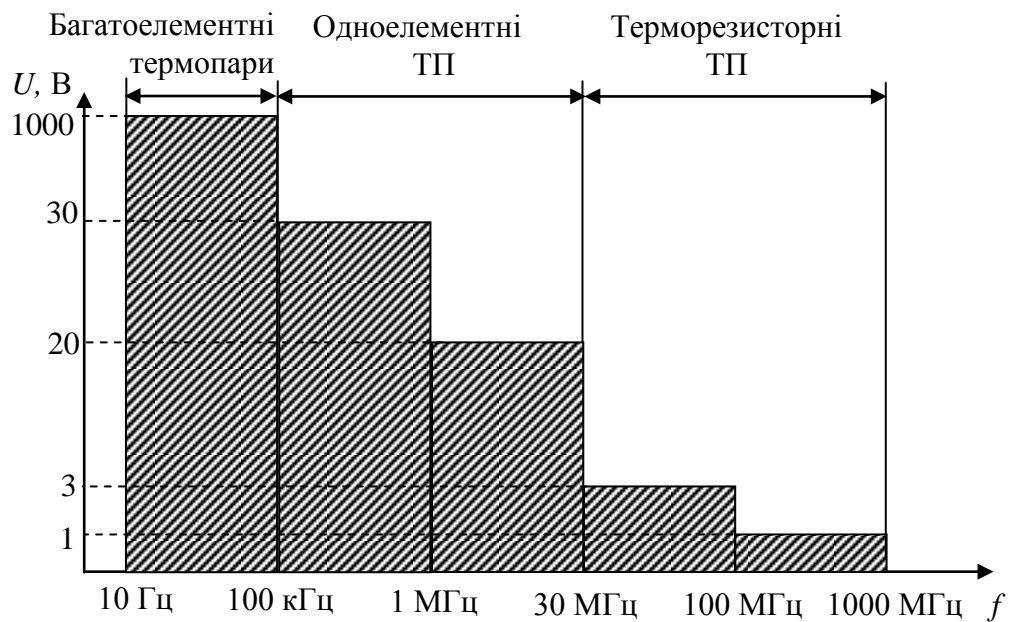
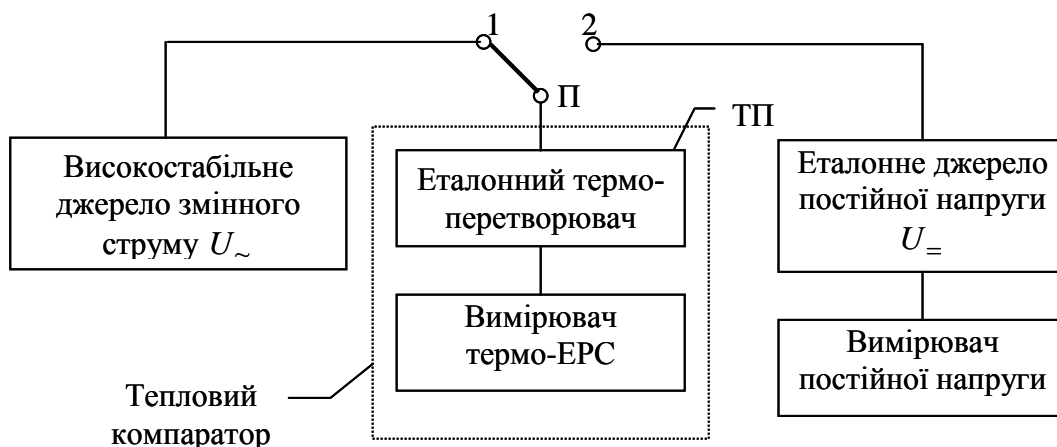


Рис. 5.2. Частотний і динамічний діапазони еталонів змінної напруги

5.1.3 Еталон змінної напруги в діапазоні низьких і середніх частот

У спрощеному вигляді структурну схему еталона в цьому діапазоні можна подати у вигляді, наведеному на рис. 5.3. На еталонний термоперетворювач (ТП) по чергову подається вимірювана змінна напруга і постійна напруга, значення якої може бути встановлене (виміряне) з необхідною точністю [36, 37].

При подачі на вхід ТП змінної напруги U_{\sim} (перемикач П в положенні 1) фіксується термо-ЕРС E на його виході, пропорційна $U_{СК}$. Потім на вхід ТП подається постійна напруга $U_{=}$ і регулюється її рівень до одержання термо-ЕРС на виході ТП, рівної E . Тоді $U_{СК} = U_{=}$. Термо-ЕРС E і напруга $U_{=}$ вимірюються, як правило, компенсаційним методом за допомогою відповідних пристроїв, що входять до складу еталона (міри ЕРС, потенціометра, подільника напруги).



Як джерело змінної напруги в еталонах використовуються або вимірювальні генератори (за необхідності з підсилювачем), або спеціальні прецизійні джерела, що одержали назву мір (калібраторів) напруги.

Найважливішим пристроєм еталона, що визначає його метрологічні характеристики, є термоперетворювач. У різних країнах цей вузол реалізується по-різному, хоча основна вимога до нього є загальною: мінімальна різниця в перетворенні постійної і змінної напруг в теплову енергію (термо-ЕРС), яка характеризується похибкою переходу від постійного до змінного струму. Для аналізу цієї похибки необхідно розглянути конструкції ТП. Як сказано вище, для покриття діапазону частот від 20 Гц до 30 МГц використовуються два види ТП: багатоелементний для діапазону 0,02–100 кГц і одноелементний – для діапазону 0,1–30 МГц.

Основним вузлом більш низькочастотного перетворювача є повітряний безконтактний багатоелементний ТП (рис. 5.4), що являє собою термобатарей, в якій на ніхромовому стрічковому нагрівачі рівномірно розташовані кілька десятків послідовно з'єднаних хромель-копелевих термопар [28]. При напрузі понад 3 В послідовно з нагрівачем ТП включається додатковий резистор.

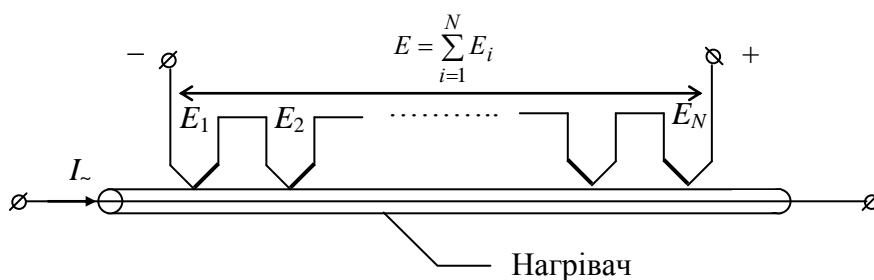


Рис. 5.4. Схема багатоелементного термоперетворювача

Найважливішими вимогами до додаткового резистора є його дуже мала реактивність (для мінімізації частотної похибки) і висока точність підгонки опору.

Перетворювач для частот вище 100 кГц виконується коаксіальним з безконтактним одноелементним вакуумним термоперетворювачем (ТВБ). Додатковий резистор розташовується разом із ТВБ в одному масивному екрані. Схему термоперетворювача типу ПНТЭ-6 наведено на рис. 5.5. Існують також термоперетворювачі з двома послідовно чи паралельно включеними ТВБ (типу ПНТЭ-10).

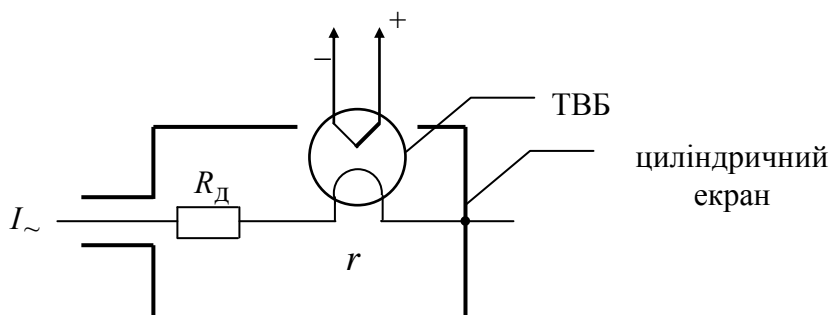


Рис. 5.5. Схема термоперетворювача ПНТЭ-6

Ряд закордонних фірм, зокрема, “Holt”, “Fluke” (США), розробили єдиний еталонний одноелементний перетворювач у всьому діапазоні до 30 МГц із декількома додатковими резисторами. Так, у ТП Fluke 792 А, визнаному одним із кращих у світі, сполучені один ТП і багатозначний перемикач додаткових резисторів або підсилювачів (для перекриття необхідного динамічного діапазону). В еталоні РТВ (Німеччина) кожний піддіапазон (за напругою) реалізується жорстко з'єднаним термоперетворювачем і додатковим частотно-компенсованим резистором.

Основними складовими похибки відтворення змінної напруги в еталонах, що використовують ТП, є [36, 37]:

- похибка термоперетворення, тобто переходу від постійної напруги до змінної (систематична);

- похибка вимірювання постійної напруги, значення якої залежить від застосованих технічних засобів і методу вимірювання (систематична);

- похибка компарування, тобто установа рівності термо-ЕРС при подачі на ТП постійної і змінної напруг (випадкова).

Домінуючою з них є **похибка термоперетворення**, яка у свою чергу має дві складові:

а) похибку асиметрії через ефект Пельтьє*, пов'язаний з полярністю постійного струму в нагрівачі;

б) частотну похибку – через наявність реактивних складових опорів і поверхневого ефекту в схемі ТП.

Похибка вимірювання постійної напруги і компарування, як правило, нижче похибки термоперетворення і більш докладно не розглядається.

Похибка асиметрії обумовлена неоднаковим розподілом температури вздовж нагрівача на постійному і змінному струмі і не залежить від частоти останнього. Цю похибку можна зменшити кількома способами: конструкторсько-технологічними, наприклад, раціональним вибором матеріалу нагрівача, оптимальним конструкторським рішенням, застосуванням багатоелементних ТП; методичним – вимірюванням при двох полярностях постійного струму й обчисленні результату як їх середнього арифметичного. У кращих ТП похибка асиметрії становить менше за 10^{-6} .

Частотна похибка визначається у такий спосіб. Перетворювач (0,1-30 МГц) складається з безконтактного термоперетворювача ТВБ і додаткового резистора R_d (рис. 5.5). Еквівалентна схема цього ТП може бути подана у вигляді, показаному на рис. 5.6.

З урахуванням впливу поверхневого ефекту в нагрівачі частотна похибка має вигляд:

* Якщо вздовж провідника існує градієнт температури, то при проходженні струму в ньому із гарячої в холодну ділянку через явище термо-ЕРС виділяється додаткове тепло (окрім Джоулевого), а при переході електронів з холодної у гарячу ділянку – додаткове тепло поглинається.

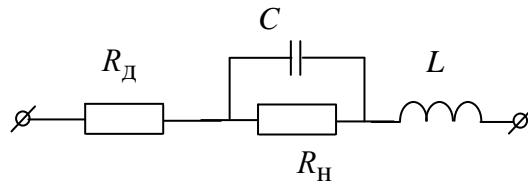


Рис. 5.6. Еквівалентна схема одноелементного ТП типу ПНТЕ

$$\delta_{\omega} = \frac{|Z_{\text{вх}}|}{R_{\text{H}} + R_{\text{д}}} \sqrt{\frac{R_{\text{H}}}{R_{\omega}}}, \quad (5.6)$$

де $|Z_{\text{вх}}|$ – повний вхідний опір перетворювача на змінному струмі; R_{H} і R_{ω} – відповідно опір нагрівача постійному і змінному струму; $R_{\text{д}}$ – опір додаткового резистора на постійному струмі.

У загальному виді схеми ТП розглядають як довгу лінію з рівномірно розподіленими параметрами, навантажену активним опором нагрівача ТП. Тоді при $R_{\text{д}} \gg R_{\text{H}}$ маємо [36, 37]

$$\delta_{\omega} = -\frac{\omega^2}{Z} \left(\frac{L^2}{R_{\text{д}}^2} - \frac{LC}{3} + \frac{R_{\text{д}}^2 C^3}{90} \right).$$

Значення рівномірно розподіленої індуктивності і ємності обчислюються за формулами

$$L = 4,6 \cdot 10^{-7} \mu l_R \lg \frac{D}{d}; \quad C = \frac{0,24 \cdot 10^{-10} \varepsilon l_R}{\lg D/d},$$

де D – внутрішній діаметр зовнішнього циліндра, м; d – діаметр резистора, м; l_R – довжина резистора, м; μ і ε – магнітна і діелектрична проникності середовища.

Тут знехтувані реактивності виводів додаткового резистора і ТП, а також ємності, які шунтують резистор.

При конструюванні перетворювачів у першу чергу необхідно зменшити залишкові реактивності всіх елементів і поверхневий ефект. Цим умовам задовольняє використання коаксіальної конструкції.

На практиці роль домінуючої реактивності, як правило грає ємність C_{H} між нагрівачем і корпусом (рис. 5.7).

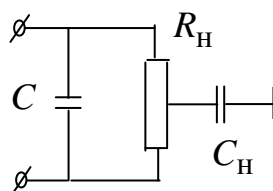


Рис. 5.7. Спрощена еквівалентна схема ТП

Цю ємність можна коректно вимірювати, наприклад, високочутливим мостом (C_H порядку 0,1 пФ) і обчислити постійну часу нагрівача $\tau_H = C_H R_H$, тоді частотна похибка $\delta_\omega = \left(\frac{\omega\tau_H}{4}\right)^2$ (визначається для ряду значень частотного діапазону).

Далі знаходять значення $\delta_{\omega i}$ для інших меж вимірювань (із включенням додаткових опорів і підсилювачів) у такий спосіб. Вимірюють шляхом термоелектричного компарування змінну напругу U_{\sim} на двох суміжних межах, для одної з яких вона є верхньою границею, а для наступного – нижньою. Одержують $U_{\sim 1}$ і $U_{\sim 2}$. При цьому $U_{\sim 1}$ отримано з похибкою $\delta_{\omega 1}$, а в значення $U_{\sim 2}$ додатково входить $\delta_{\omega 2}$ через реактивності кіл нового піддіапазону. Її відносне значення дорівнює

$$\delta_{\omega 2} = \frac{U_{\sim 2} - U_{\sim 1}}{U_{\sim 1}} 100\%.$$

Тоді для другого піддіапазону частотна похибка дорівнює $\sqrt{\delta_{\omega 1}^2 + \delta_{\omega 2}^2}$. Вимірювання виконуються для всіх прийнятих значень частотного діапазону і всіх меж вимірювань.

Наведемо типові значення метрологічних характеристик еталонів для діапазону частот 20 Гц – 30 МГц:

діапазон вимірювань, В	0,1 – 10;
діапазон передачі, В	до 1000;
НСП (θ_0)	$1 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-4}$;
СКВ (S_0)	$5 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-5}$.

Комплект ТП, що використовується в еталоні, наведений на рис. 5.8.



Рисунок 5.8 – Комплект еталонних термоелектричних перетворювачів с додатковими резисторами зі складу ДЕ Росії

Як вторинні еталони в країнах СНД використовуються еталони РЕН-2 і РЕН-2М (у діапазоні частот 20 Гц – 30 МГц, похибка від $1 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-3}$) (рис. 5.9).

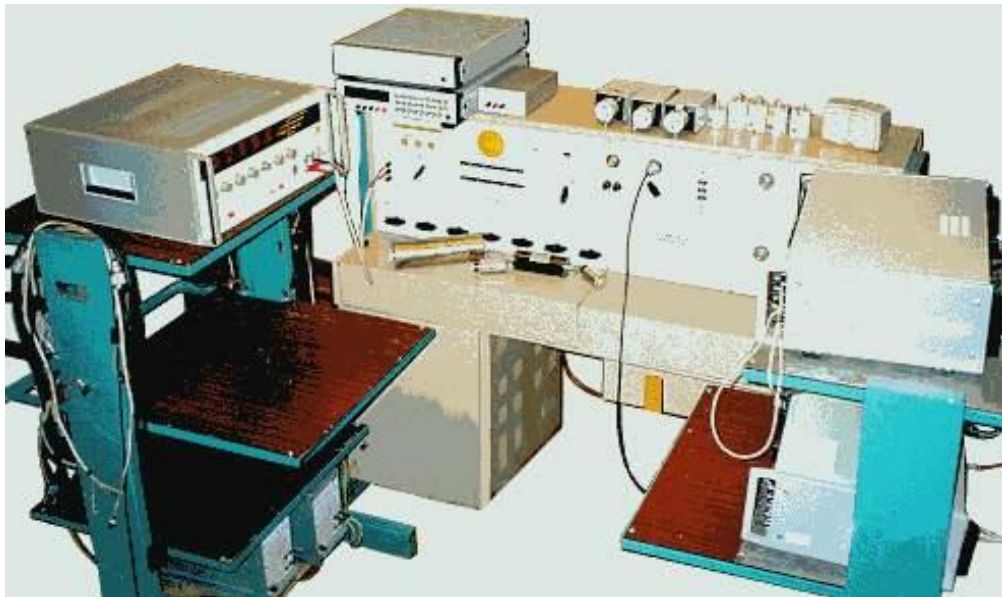


Рис. 5.9. Еталон РЕН-2

5.1.4 Еталон одиниці напруги на високих частотах

На частотах вище 30-50 МГц схема, показана на рис. 5.3, призводить до дуже значної частотної похибки, тому в цьому діапазоні застосовують інші технічні рішення, хоча метод теплового компарування залишається в основі побудови еталона.

Структурну схему державного еталона Росії в діапазоні ВЧ і УВЧ подано на рис. 5.10 [37].

У цьому варіанті терморезистори включаються в мостову схему, за допомогою якої здійснюється зрівноваження вимірюваної ВЧ напруги напругою постійного струму.

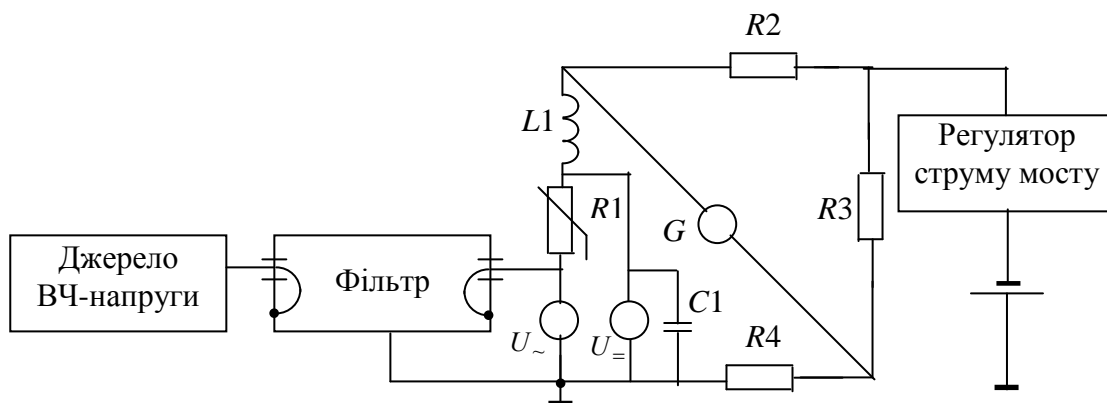


Рис. 5.10. Структурна схема еталона змінної напруги для частот понад 30 МГц

Еталон складається з таких основних пристроїв:

- джерел ВЧ-напруги;
- смугових фільтрів;
- терморезисторного перетворювача напруги;
- урівноваженого моста постійного струму, в одне з пліч якого включений термоперетворювач;
- прецизійного вимірювача постійної напруги.

Принцип дії еталона ґрунтується на опосередкованому визначенні відтвореної напруги змінного струму U_{\sim} за результатами прямих вимірювань напруги постійного струму в двох режимах: за відсутності змінної напруги (U_1) і за її наявності (U_2).

Методика вимірювань полягає в наступному. Спочатку, при відсутності на вході перетворювача змінної напруги, міст врівноважується і вимірюється падіння напруги постійного струму U_1 на терморезисторі R_1 . Потім на вхід терморезисторного перетворювача подається змінна напруга U_{\sim} . При цьому регулятор струму моста автоматично зменшує струм до досягання балансу моста, після чого вимірюється падіння напруги постійного струму U_2 на терморезисторі R_1 . Значення відтвореної напруги розраховується за формулою

$$U_{\sim} = \sqrt{U_1^2 - U_2^2} = \sqrt{(2U_2 + \Delta U)\Delta U}, \quad \Delta U = U_1 - U_2. \quad (5.7)$$

В еталоні Росії як терморезистор застосований платиновий болометр, у якому термочутливий елемент виконаний із платинового дроту. Болометр включено у спеціальну конструкцію – діодно-болометричну головку, що дозволяє забезпечити паралельне включення терморезистора і вимірювальної головки (пробника) вольтметра, що калібрується, а також підключення до терморезистора напруг змінного і постійного струмів.

Дослідження показують, що частотна систематична похибка термоперетворювачів на терморезисторах, пов'язана з наявністю реактивностей, становить від 0,4 % на частоті 400 МГц до 8,9 % на частоті 1500 МГц (рис. 5.11).

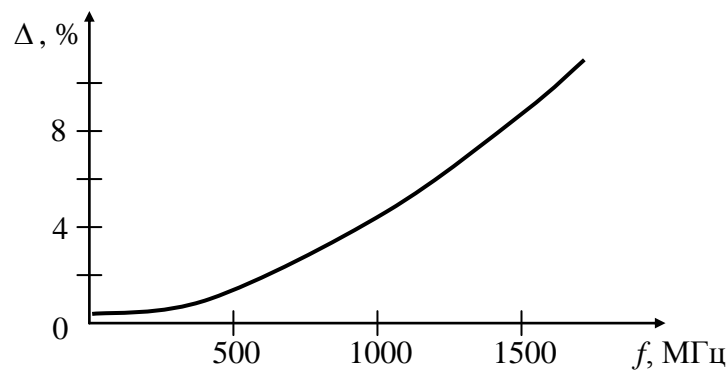


Рис. 5.11. Частотна похибка термоперетворювача

Для зменшення цієї похибки її визначають за параметрами еквівалентної

схеми перетворювача (рис. 5.12) розрахунково-експериментальним шляхом, а потім вносять поправки.

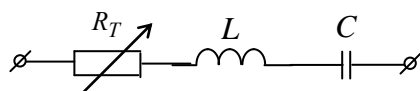


Рис. 5.12. Еквівалентна схема високочастотного ТП на частотах понад 30 МГц

Індуктивність обумовлена тілом термоперетворювача і виводами, ємність – це конструктивна ємність схеми. Реактивний опір ТП $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ можна визначити методом варіації активного опору болометра шляхом зміни робочого опору R моста постійного струму. Якщо при постійній частоті і постійному значенні напруги на вході вольтметра, що повіряється, змінювати опір ТП постійному струму R_T і визначати при цьому напругу U_{\sim} за формулою (5.7), то повинна дотримуватися рівність

$$U_{\sim 1} \sqrt{\frac{(1 + X^2)}{R_{T1}}} = U_{\sim 2} \sqrt{\frac{(1 + X^2)}{R_{T2}}}.$$

Вирішуючи це рівняння, можна визначити X_i . Повторюючи процедуру кілька разів для різних значень R_T можна скласти систему рівнянь відносно L і C . Рішення системи методом найменших квадратів дозволяє одержати ймовірні значення L й C і похибки їхнього визначення.

Для застосовуваних у державному еталоні Росії болометрів БП4-150 отримано значення $L = (0,925 \pm 0,005) \cdot 10^{-8}$ Гн, $C = (110 \pm 10) \cdot 10^{-12}$ Ф. На основі цих значень визначається частотна поправка (у відсотках)

$$\Delta_0 = \left[\sqrt{1 + X^2 / R_T^2} - 1 \right] \cdot 100 \quad (5.8)$$

і дійсне значення відтвореної напруги $U_d = U_{\sim} (1 + \Delta_0 / 100)$.

НСП еталона практично цілком визначається похибкою знаходження поправки Δ_0 (на частоті 1500 МГц ця похибка оцінюється значенням $6 \cdot 10^{-3}$).

Друге джерело НСП – наближений характер еквівалентної схеми, наведеної на рис. 5.12. Ця похибка незначна.

Третім джерелом НСП є можлива нееквівалентність заміщення струму ВЧ і постійного струму, зв'язана з розходженням у розподілі теплових джерел у болометрі при проходженні струму ВЧ і постійного струму. Експерименти показують, що ця похибка може досягати декількох десятих відсотка.

Зазначимо, що з метою мінімізації частотної похибки в США створили спеціальний болометр Volovac. Похибка вимірювання напруги з його допомогою на частотах до 2 ГГц не перевищує 1 %, при 8 ГГц – 4 %. Конструкція Volovac визнається працездатною аж до частоти 18 ГГц [23].

Державний еталон Росії (рис. 5.13) працює в діапазоні 30 – 3000 МГц, має такі метрологічні характеристики:

діапазон вимірювань, В	0,1 – 1
НСП (θ_0)	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$
СКВ (S_0)	$5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$.

Наведемо конструкцію термоперетворювача, який використовується в первинному еталоні ВЧ-напруги України [38].

Суть конструкції розробленого ТП полягає в тому, що для перетворення електричної енергії в теплову використовується безреактивний резистор (безкорпусний резистор SMD-типу). З боку, протилежного резистивному шару, приклеєно термістор, який перетворює теплову енергію в електричний параметр – зміну власного електричного опору.

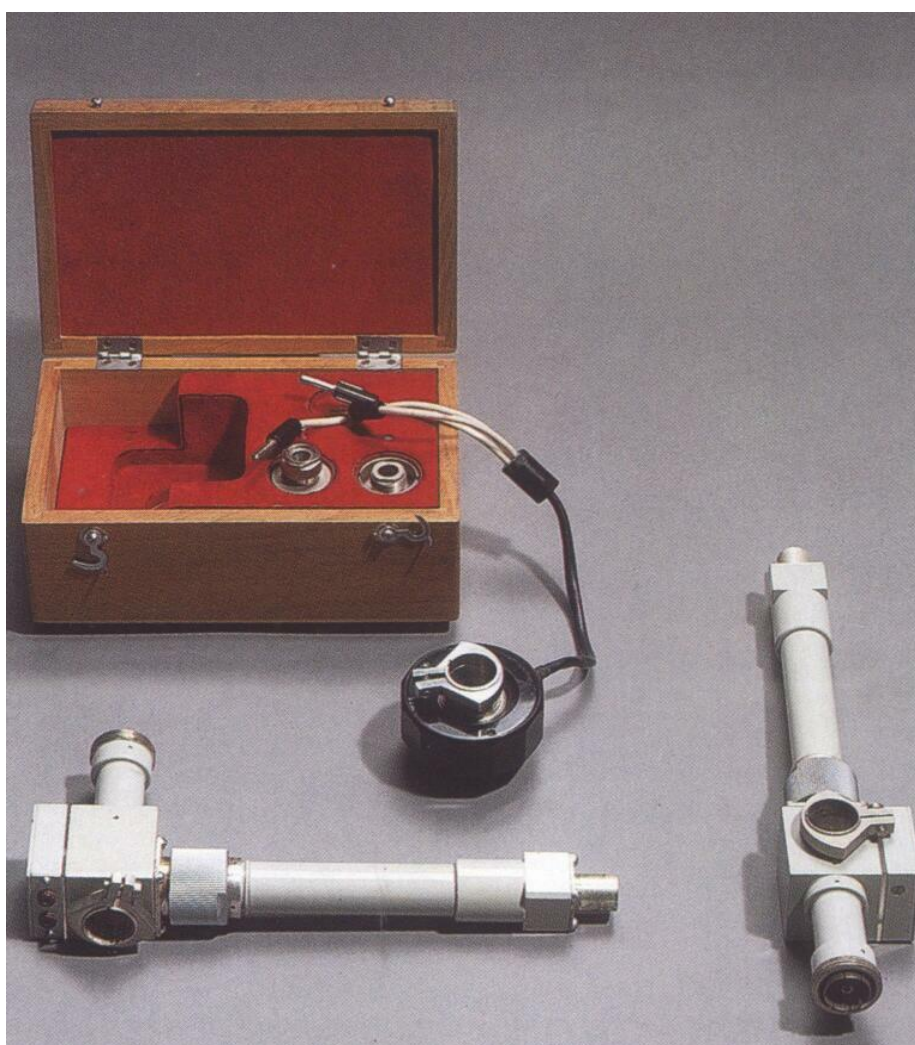


Рис. 5.13. Комплект еталонних терморезисторних перетворювачів еталона змінної напруги Росії

Еквівалентну схему термоперетворювача наведено на рис. 5.14. Схематично конструкцію перетворювача показано на рис. 5.15.

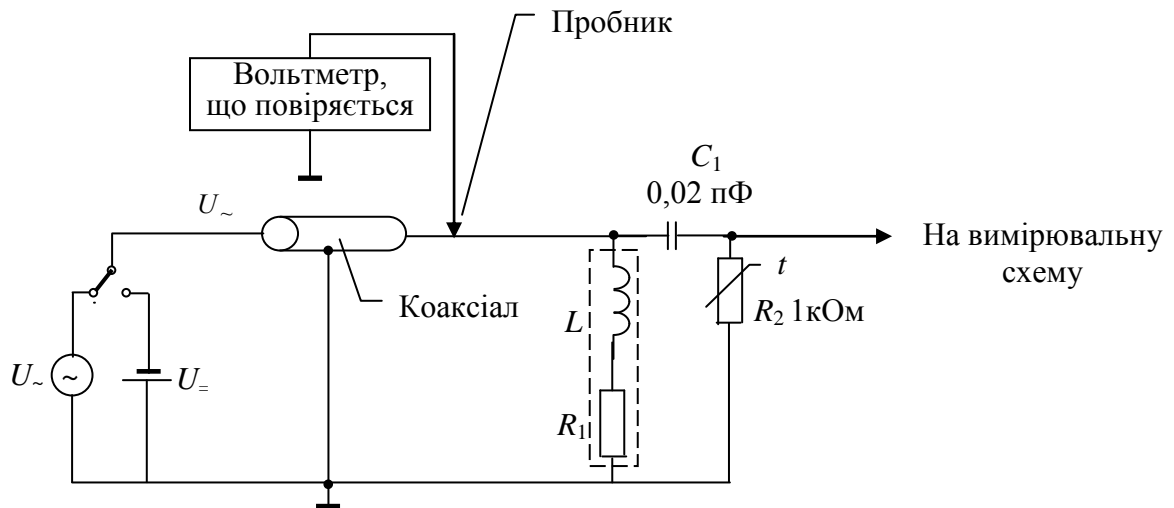


Рис. 5.14. Еквівалентна схема ТП еталона: R_1 – навантажувальний резистор; L – паразитна індуктивність резистора; C_1 – паразитна ємність, що характеризує електричний зв'язок між резистором R_1 і термістором R_2 ($C_1 \approx 0,02$ пФ)

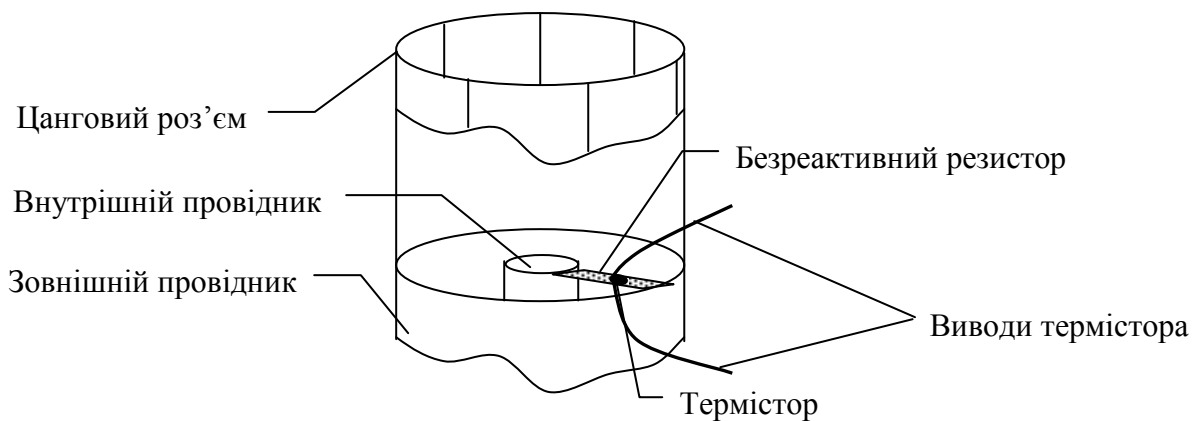


Рис. 5.15. Конструкція ТП з резистором

На зріз коаксіальної лінії насаджений цанговий роз'єм, у який вмикається пробник вольтметра, що повіряється (на рисунку пробник не показано). Між обома провідниками коаксіальної лінії безпосередньо на самому зрізі впаяно безреактивний резистор, зображений прямокутником. З боку, протилежного резистивному шару, на керамічну підложку приклеєно термістор, який разом з резистором утворює терморезистор опосередкованого підігріву. Виводи термістора підключаються до пристрою реєстрації (за допомогою фільтруючих ланцюгів). Така конструкція забезпечує малу частотну залежність коефіцієнта перетворення, надійний тепловий контакт резистора з термістором і слабкий електричний зв'язок між ними.

Зазначимо, що паразитні ємності між виводами резистора, а також між виводами і корпусом принципово не впливають на частотні властивості термоперетворювача, оскільки ні змінний, ні постійний струм, які нагрівають резистор, через них не йдуть. Ці ємності лише додатково навантажують джерело сигналу. Таким чином, єдиним джерелом частотної похибки є власна реактивність (індуктивність L) навантажувального резистора, а еквівалентна схема має вигляд, зображений на рис. 5.16.

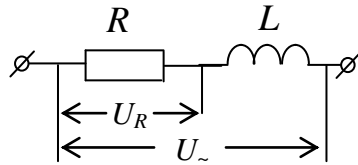


Рис. 5.16. Еквівалентна схема

Розглянемо частотну похибку даного ТП, враховуючи, що термоперетворювач реагує на потужність сигналу. Значення потужності при подаванні постійної напруги E дорівнює E^2/R , при подаванні ВЧ-напруги

$$U_{\sim} = \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}},$$

де R – опір ТП постійному струму; $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ – опір ВЧ-струму. Оскільки при тепловому компаруванні ми встановлюємо рівність теплових енергій (потужностей), то

$$\frac{E^2}{R} = \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{або} \quad U^2 = E^2 \sqrt{1 + (R/\omega L)^2}.$$

Розкладемо праву частину останнього виразу в ряд Тейлора, одержимо

$$\begin{aligned} \frac{U^2}{E^2} &= 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2; \\ \frac{U}{E} &= \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2} = 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2; \\ U &= E \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Похибка θ_1 буде дорівнювати

$$\theta_1 = \frac{U - E}{E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2. \quad (5.9)$$

Таким чином, для мінімізації частотної похибки треба використовувати резистор з мінімальним L , а для кількісної оцінки цієї похибки еталона необхідно якимось чином оцінити значення L . Перша задача вирішувалася шляхом вибору спеціального безкорпусного НВЧ резистора серії SMD, виготовленого за імпульсною технологією. Оскільки напряду виміряти значення L безпосередньо у схемі утруднено через паразитні параметри схеми і засобів вимірювання, воно оцінювалося через інформацію фірм-виробників, розрахунки за геометричними розмірами і опосередковані вимірювання. Аналіз значень L , одержаних різними методами і розрахунками, дозволяє оцінити її нижче за 1 нГн, а найбільш достовірне значення лежить в інтервалі 0,5-0,8 нГн.

Конструктивно термоперетворювач виконано таким чином, щоб забезпечити включення пробника вольтметра в потенціальну точку терморезистора і забезпечити мінімум реактансів схеми. ТП розміщений в масивному корпусі з термоізоляційних матеріалів (пінопласт, текстоліт) і являє собою термостат з додатковим терморегулюванням.

Реальна електрична схема ТП дещо відрізняється від еквівалентної.

Для запобігання створенню структури електромагнітного поля в місці включення пробника використана симетричне включення терморезисторів в схему ТП (рис. 5.17).

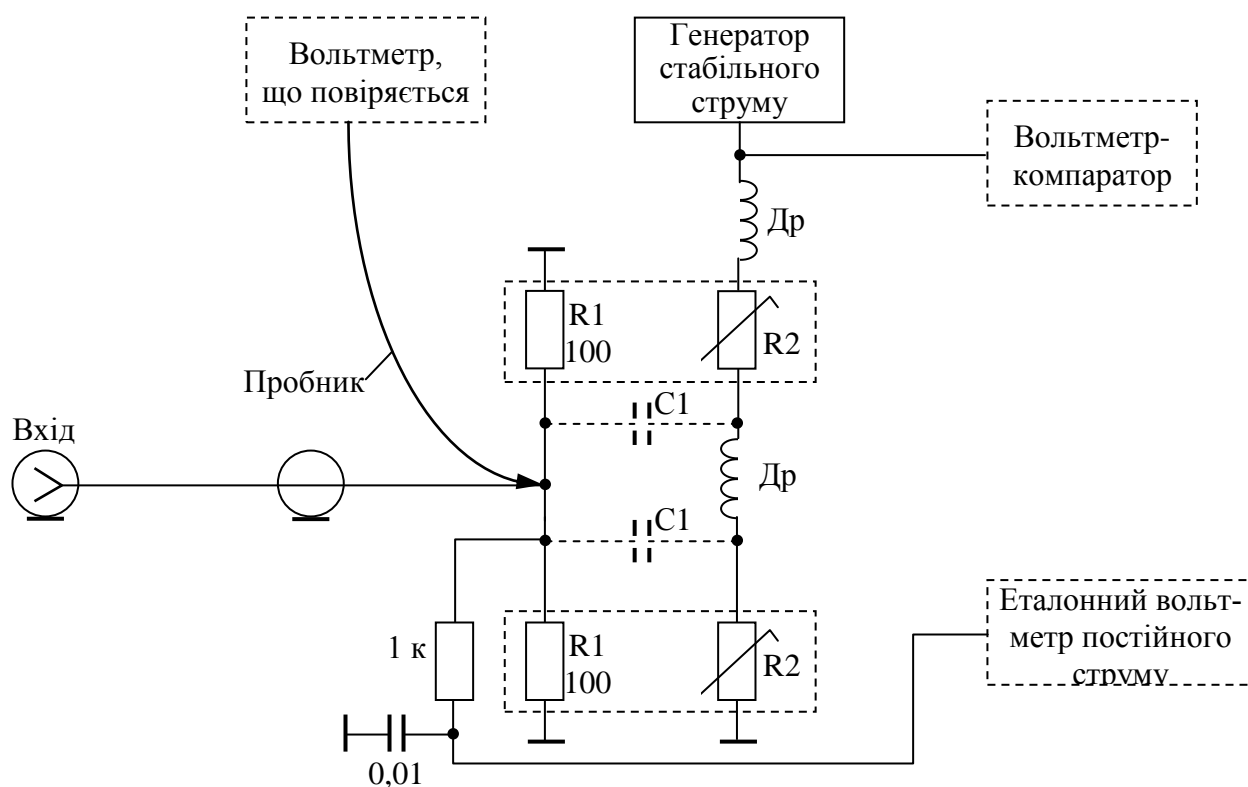


Рис. 5.17. Електрична схема термоперетворювача.

Повну структурну схему еталона наведено на рис. 5.18.

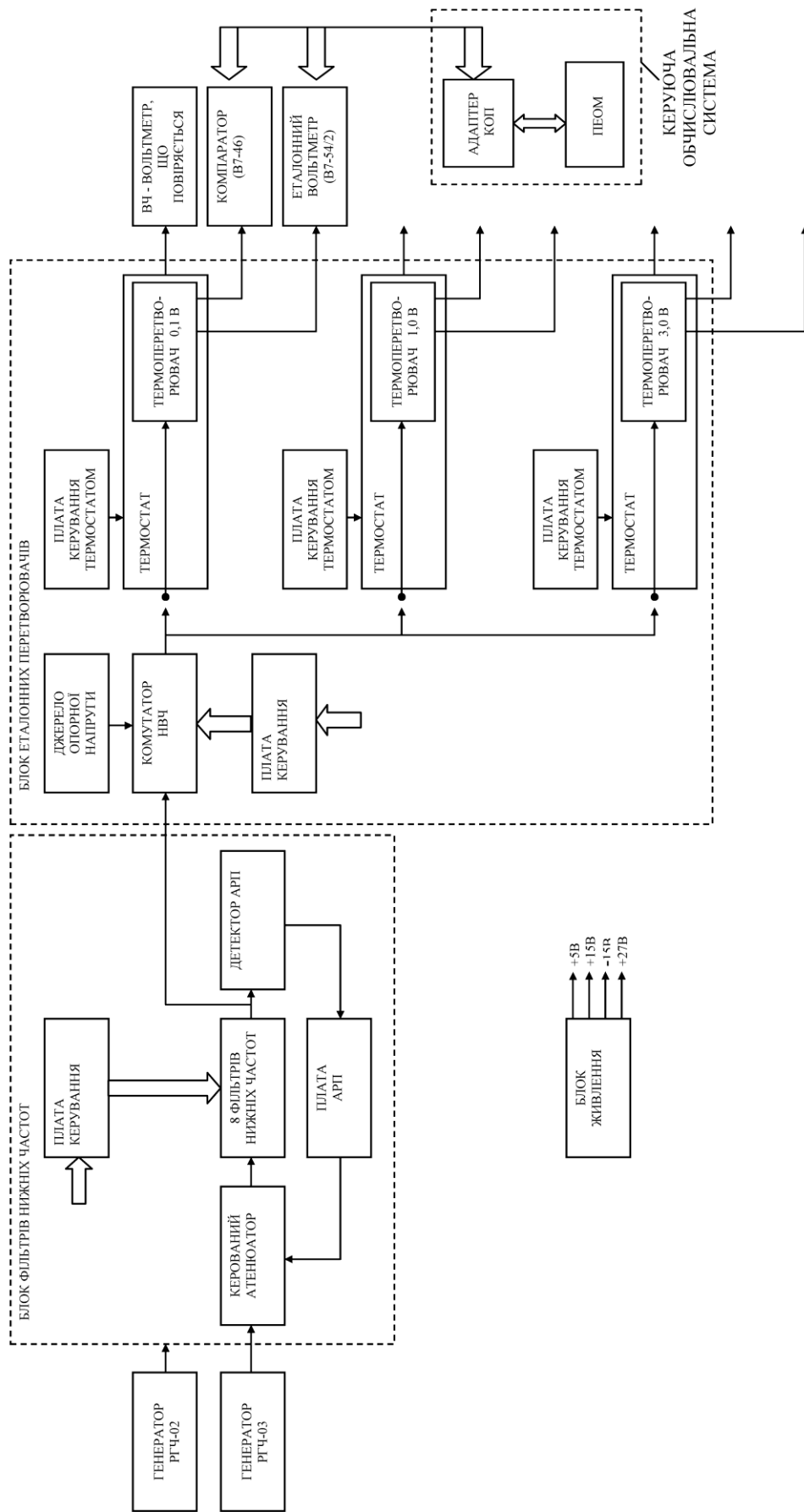


Рис. 5.18. Структурна схема еталона

Еталон має такі метрологічні характеристики:

діапазон частот	від 30 до 1000 (2000) МГц;
діапазон напруг	від 0,1 до 3 В;
відносна НСП	від $1 \cdot 10^{-4}$ до $2,6 \cdot 10^{-3}$ (у залежності від частоти);
відносна СКВ	від $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$;
розширена невизначеність	від $4 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$.

Ці характеристики відповідають світовому рівню.

Як вторинний еталон у країнах СНД використовується еталон РЕН-3 (у діапазоні 30 Гц – 2000 МГц, похибка від $7 \cdot 10^{-4}$ до $1,2 \cdot 10^{-3}$) (рис. 5.19). В основі цього еталона також лежить метод теплового компарування.



Рис. 5.19. Еталон РЕН-3

Основним видом робочих еталонів 1 розряду є діодні компенсаційні вольтметри (ВЗ-49, ВЗ-59, ВЗ-63), відносна похибка яких становить від $5 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-2}$ у залежності від частоти і напруги.

5.2 Узгодження розміру вольты в частотному і динамічному діапазонах

5.2.1 Еталони високої напруги постійного та змінного струму

У різноманітних галузях науки і техніки, перш за все, в енергетиці, системах транспортування електрики, для обліку електроенергії існує необхідність точного вимірювання високих напруг 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 (до 800 кВ на постійному струмі та $750\sqrt{3}$ кВ на змінному

струмі). Такі еталони створено в Росії, США, Німеччині, інших країнах, у тому числі і в Україні.

Розглянемо коротко принцип побудови таких еталонів.

Еталон високої напруги постійного струму, як правило будується за такою схемою.

Розмір одиниці напруги постійного струму передається від державного еталона ЕРС на ефекті Джозефсона через відповідні міри до калібраторів напруги, які відтворюють значення 1 кВ, а далі, за допомогою спеціальних пристроїв підвищують напругу до 180 кВ. Основу цих спеціальних пристроїв становлять нелінійні напівпровідникові елементи (стабілітрони), які здатні відтворювати стабільне значення напруги при силі електричного струму, забезпеченого з заданою точністю.

Таким чином, в основі еталона лежить метод масштабного перетворення еталонної напруги 1 (10 В) до напруги 180 кВ.

Відносна НСП первинного еталона України становить $3 \cdot 10^{-4}$, СКВ – $5 \cdot 10^{-4}$.

Передача розміру одиниці робочим еталонам з верхньою границею діапазону вимірювань 800 кВ здійснюється за допомогою пересувної частини державного еталона методом опосередкованих вимірювань.

Еталон очолює повірочну схему, яка поширюється на ЗВТ у діапазоні від 1 до 800 кВ.

Еталон високої напруги змінного струму (на частоті 50 Гц) також будується на методі масштабного перетворення, тобто одержує значення змінної напруги на частоті 50 Гц значенням до 1 кВ від відповідного еталона, яке за допомогою масштабних перетворювачів підвищується до $1,2 \times 330 \sqrt{3}$ кВ. Основними метрологічними пристроями еталона є багатозначні міри коефіцієнта масштабного перетворення та пристрої їх незалежної метрологічної атестації, які ґрунтуються на методі “подвоєння напруг”.

Таким чином, еталон одночасно відтворює і коефіцієнт масштабного перетворення електричної напруги на частоті 50 Гц, який передається вторинному еталону – установці для перевірки трансформаторів напруги, до складу якої входить пристрій множення напруги від $330 \sqrt{3}$ до $500 \sqrt{3}$ кВ.

Первинний еталон України має відносну НСП до $1 \cdot 10^{-3}$, СКВ – не більше $5 \cdot 10^{-4}$.

5.2.2 Узгодження еталонів вольт

Як бачимо, для відтворення розміру одиниці однієї фізичної величини – електричної напруги – у всіх частотних і динамічних діапазонах створюється кілька первинних державних еталонів. Але єдність вимірювань буде забезпечена лише тоді, коли всі вони узгоджені між собою, тобто являють єдину систему.

Як вже було сказано, вихідний розмір вольт “народжується” на постійному струмі через ефект Джозефсона і далі передається в широкий частотний і динамічний діапазон за допомогою методів теплового компарування і масштабного

перетворення. Тому схему узгодження розміру вольт (еталонів) можна подати у вигляді, наведеному на рис. 5.20.

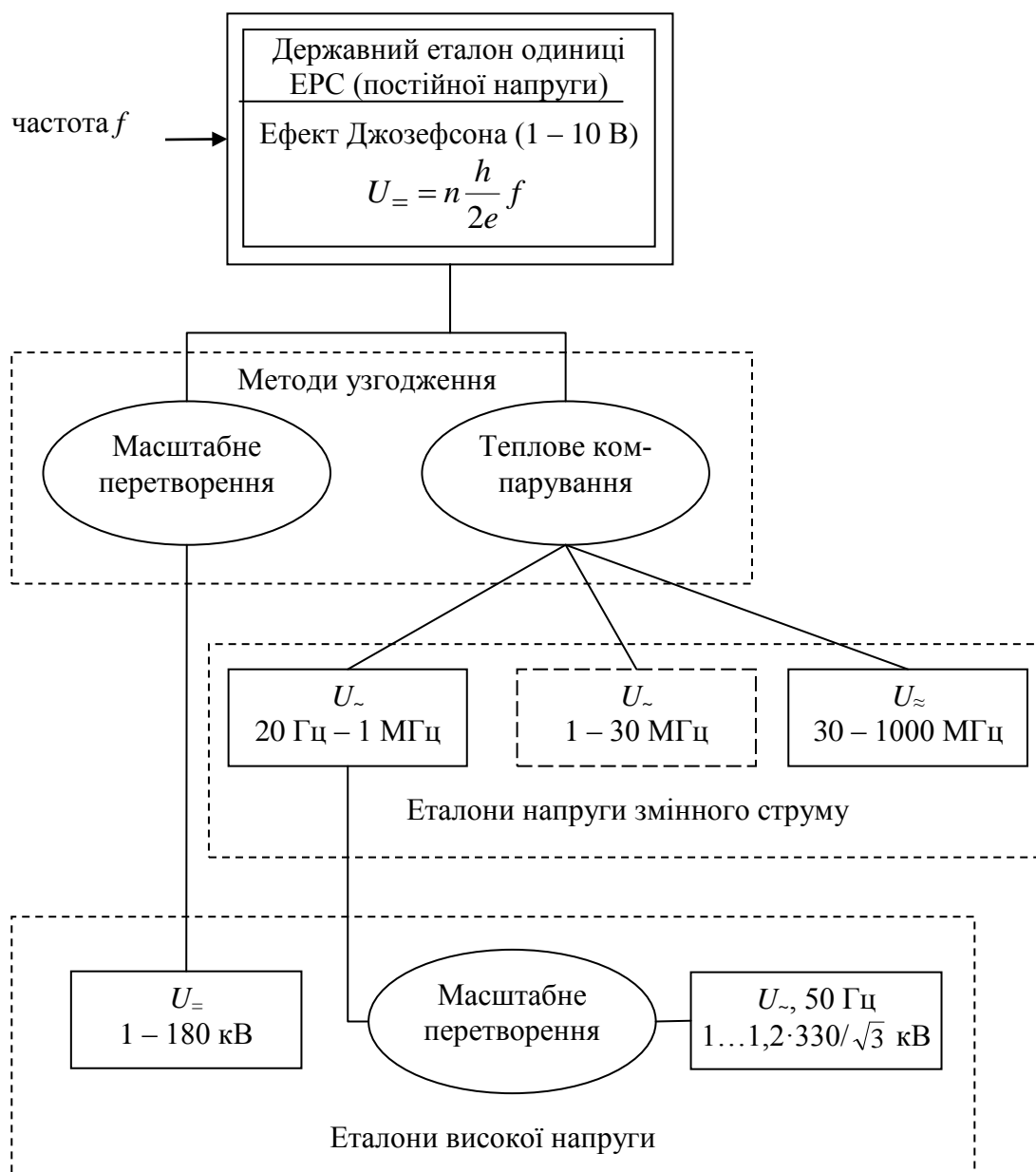


Рис. 5.20. Схема узгодження еталонів вольт

На цій схемі добре видно простежуваність кожного з еталонів до основного еталона – первинного еталона ЕРС, оскільки на ній вказано методи передачі розміру одиниці напруги і визначені похибки (невизначеності) передачі.

5.3 Еталони одиниці сили змінного струму

Як показує метрологічна практика розвинених країн, точні вимірювання сили змінного струму необхідні в діапазоні частот приблизно до 300 МГц. При цьому найбільша точність вимірювання потрібна на низьких і середніх частотах (до 1 МГц) при значеннях струму до 10 – 20 А. У більш високочастотному діапазоні вимоги до точності нижче, але сила струму може досягати сотень ампе-

рів. Тому і відповідні еталони в різних діапазонах будуються на різних принципах.

5.3.1 Еталон сили струму в діапазоні низьких і середніх частот

В еталонах одиниці сили змінного струму в цьому частотному діапазоні застосовується та ж методологія, що і в еталонах змінної напруги НЧ-діапазону, тобто відтворюється середньоквадратичне значення змінного струму

$$I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt} ,$$

а для вимірювань використовується описаний вище метод теплового компарування з різночасовим порівнянням теплової дії змінного і постійного струмів [36, 37].

Структурна схема еталона при цьому приймає вид, показаний на рис. 5.21.

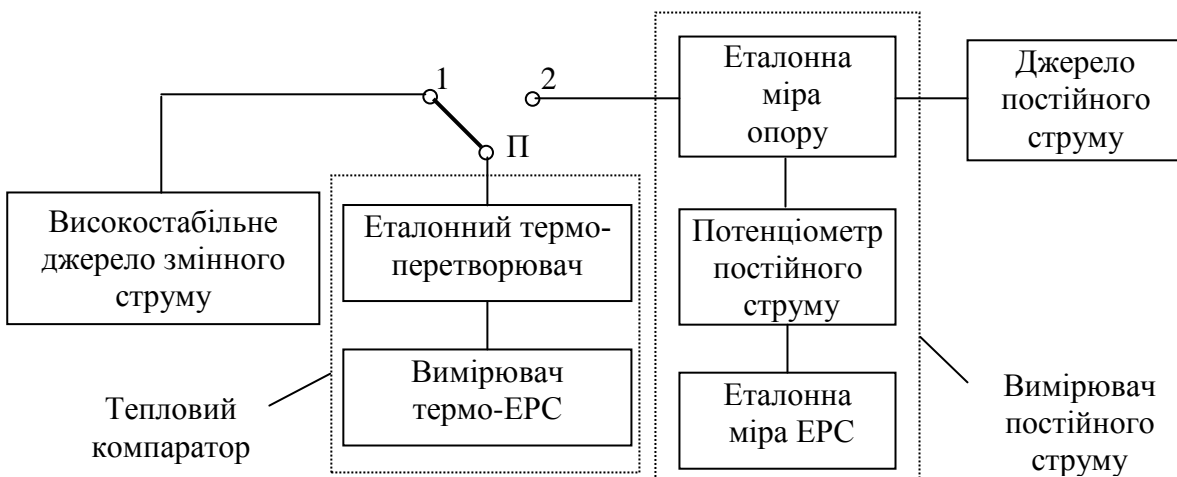


Рис. 5.21. Структурна схема еталона одиниці змінного струму НЧ-діапазону

При включенні ТП у коло змінного струму (перемикач П в положенні 1) вимірюється термо-ЕРС E_{\sim} , пропорційна $I_{СК\sim}^2$:

$$E_{\sim} = k \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = k I_{СК\sim}^2 . \quad (5.10)$$

Потім ТП включають у ланцюг постійного струму. При цьому термо-ЕРС $E_{=} = k I_{=}^2$. Постійний струм регулюють таким чином, щоб одержати те ж значення термо-ЕРС, що і при подачі змінного струму, тобто $E_{=} = E_{\sim}$.

При цьому $I_{=}$ вимірюють за допомогою потенціометра і мір ЕРС та опору. На основі рівності $E_{=} = E_{\sim}$ маємо $k I_{=}^2 = k I_{СК\sim}^2$, тобто $I_{=} = I_{СК\sim}$. Відзначимо, що джерела і характер похибок відтворення одиниці сили змінного струму аналогічні тим, що мають місце при відтворенні одиниці змінної напруги, однак є і деякі

особливості, що впливають на конструкцію еталона, зокрема термоперетворювачів.

Оскільки в сумарній похибці відтворення розміру ампера похибка переходу зі змінного струму на постійний є домінуючою, то основні зусилля спрямовуються на розробку розрахункових та експериментальних методів її визначення і мінімізації. Зокрема, у багатьох еталонах обрана групова структура побудови, тобто по 2 – 3 еталонних ТП на кожний з номінальних струмів (рис 5.22).



Рис. 5.22. Комплект еталонних термоелектричних перетворювачів змінного струму

Кожна група складається з ТП різних конструкцій. Так, в еталоні Росії до складу груп ТП на номінальні струми від 1 до 100 мА, крім вакуумних ТП типу ТВБ, входять повітряні багатоелементні ТП. Група ТП на струми від 0,3 до 20 А складається з багатоелементних ТП прямого включення, тобто без шунтів. Таким чином, створено різні конструкції ТП із використанням різних матеріалів і сплавів, оптимальні для конкретних значень струмів і піддіапазонів частот.

Групова структура еталона дозволяє визначати його метрологічні характеристики і частотні властивості шляхом взаємних звірень різних ТП.

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 із СКВ від $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ і НСП від $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-4}$.

Вторинні еталони, що застосовуються в СНД, також базуються на методі теплового компарування і мають діапазон струмів 10^{-3} – 25 А, діапазон частот 20 - 10^6 Гц і довірчі границі похибки $(1,5 - 6,5) \cdot 10^{-5}$.

5.3.2 Еталон сили струму в діапазоні високих частот

Вимірювання сили струму високої частоти необхідні для контролю параметрів засобів зв'язку, радіолокації, радіонавігації, контролю якості виробів радіотехнічної та електронної промисловості. Широке поширення одержали термоамперметри, що працюють у діапазоні частот до 300 МГц, а також вимірювачі сили струму в еквіваленті антени. Вимірювання сили струму на ВЧ необхідні в широкому динамічному діапазоні – від сотень міліампер до сотень ампер, при цьому значенням струму характеризують інтенсивність сигналу на “передавальній стороні” радіотехнічних систем. Для забезпечення перевірок амперметрів ВЧ у деяких країнах, зокрема в Росії, створені еталони одиниці сили струму ВЧ [23, 37]. Розглянемо принцип його побудови.

Відтворення одиниці сили струму ВЧ базується на електродинамічному перетворенні енергії електромагнітного поля в механічну енергію коливань кільця, розташованого в цьому полі. Схему первинного перетворювача наведено на рис. 5.23. У результаті дії ВЧ-струму, що протікає по внутрішньому провіднику коаксіальної лінії, у металевому кільці наводиться вторинний струм, і через взаємодію двох струмів з'являється обертаючий момент M . Значення M визначається силою струму і параметрами системи за виразом [23]:

$$M = -\frac{I^2}{L} L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \alpha} \frac{\cos\left(\arctg \frac{R}{\omega L}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}}, \quad (5.11)$$

де I – сила струму ВЧ у лінії; L_{12} – взаємодукація між лінією і кільцем; R – активний опір кільця; ω – частота струму; α – кут повороту кільця щодо площини поперечного перерізу лінії; W – пружність нитки підвісу.

Обертаючий момент, відповідно до (5.11), залежить від сили струму, геометричних характеристик кільця, взаємного розташування кільця і лінії, активного опору кільця і частоти струму. Кільце виконується з матеріалу з високою провідністю, так що при досить високій частоті ($R \ll \omega L$) залежність періоду механічних коливань кільця від частоти струму є досить слабкою.

З викладеного очевидно, що при незмінній геометрії рухливої системи і високій частоті період коливань буде тільки функцією струму в лінії.

Середнє квадратичне значення сили струму визначається за формулою

$$I_{\text{ск}} = \frac{C_e}{T} \sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2}, \quad (5.12)$$

де C_e – стала еталона, що залежить від його геометричних розмірів; T – період власних коливань кільця при наявності струму в лінії; T_0 – період власних коливань кільця, обумовлений пружністю нитки підвісу й інших факторів при відсутності струму в лінії.

Період коливань визначається через число коливань, що відлічуються автоматично за допомогою променя світла, який направляється на дзеркальце, і електронного секундоміра (рис. 5.23).

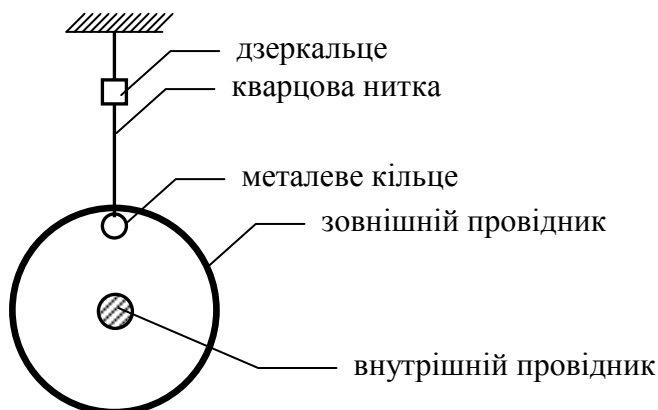


Рис. 5.23. Схема первинного перетворювача еталона

Процедура вимірювань за допомогою еталона полягає в наступному. Спочатку визначають період власних коливань T_0 при відсутності струму, а потім електромагнітом закручують рухливу систему на кут α_0 , включають вимірюваний струм, звільняють підвіс і відраховують необхідне число коливань за допомогою фотореле, лічильника імпульсів, електронного секундоміра, до якого підводиться еталонна частота 10 кГц.

Випадкова похибка еталона значною мірою залежить від зовнішніх факторів: нестабільності струму, вібрацій фундаменту, конвекційних потоків, електростатичних зарядів. Для їхнього зменшення вживають спеціальні заходи.

Основними складовими систематичної похибки є: похибки визначення T і T_0 , зв'язані з загасанням коливань; похибка визначення постійної еталона C_e ; похибка, викликана відмінністю умов при вимірюванні струму і визначенні C_e .

Головна задача метрологічного дослідження еталона – визначення його сталої C_e , яке може бути проведене як розрахунковим, так і експериментальним шляхом.

Розрахунковий метод полягає у визначенні зв'язку між характеристиками кільця, конфігурації поля коаксіальної лінії, моменту інерції і т.ін. і подальшим розрахунком C_e . Експериментальний метод ґрунтується на вимірюванні відомого значення струму на одній з частот ω , іншими словами, порівнянні результатів вимірювання струму описаним та іншим методами (наприклад, методом теплового чи фотоелектричного компарування).

Створений у Росії еталон має такі метрологічні характеристики [23]:

діапазон відтворення сили струму, А	3 – 100;
діапазон частот, МГц	0,1 – 300;
невиключена систематична похибка	$1 \cdot 10^{-4}$;
СКВ результату вимірювання	$5 \cdot 10^{-4}$.

Як вторинні і робочі еталони сили струму високої частоти в СНД застосовуються прецизійні ВЧ-амперметри, що базуються на електродинамічному, термоелектричному чи фотоелектричному методах. Ці амперметри забезпечують вимірювання сили струму в діапазоні частот до 300 МГц із похибкою від 0,5 до 2,5 %.

5.4 Узгодження розміру ампера в частотному і динамічному діапазонах

В п. 4.7 показано, що еталон одиниці сили постійного струму можна створити на основі закону Ома $I = \frac{U}{R}$, при цьому значення напруги і опору простежується до еталонів на ефектах Джозефсона і Холла. Далі, як показано на рис. 5.24, одиниця сили струму переноситься на змінний струм за допомогою методу теплового компарування.

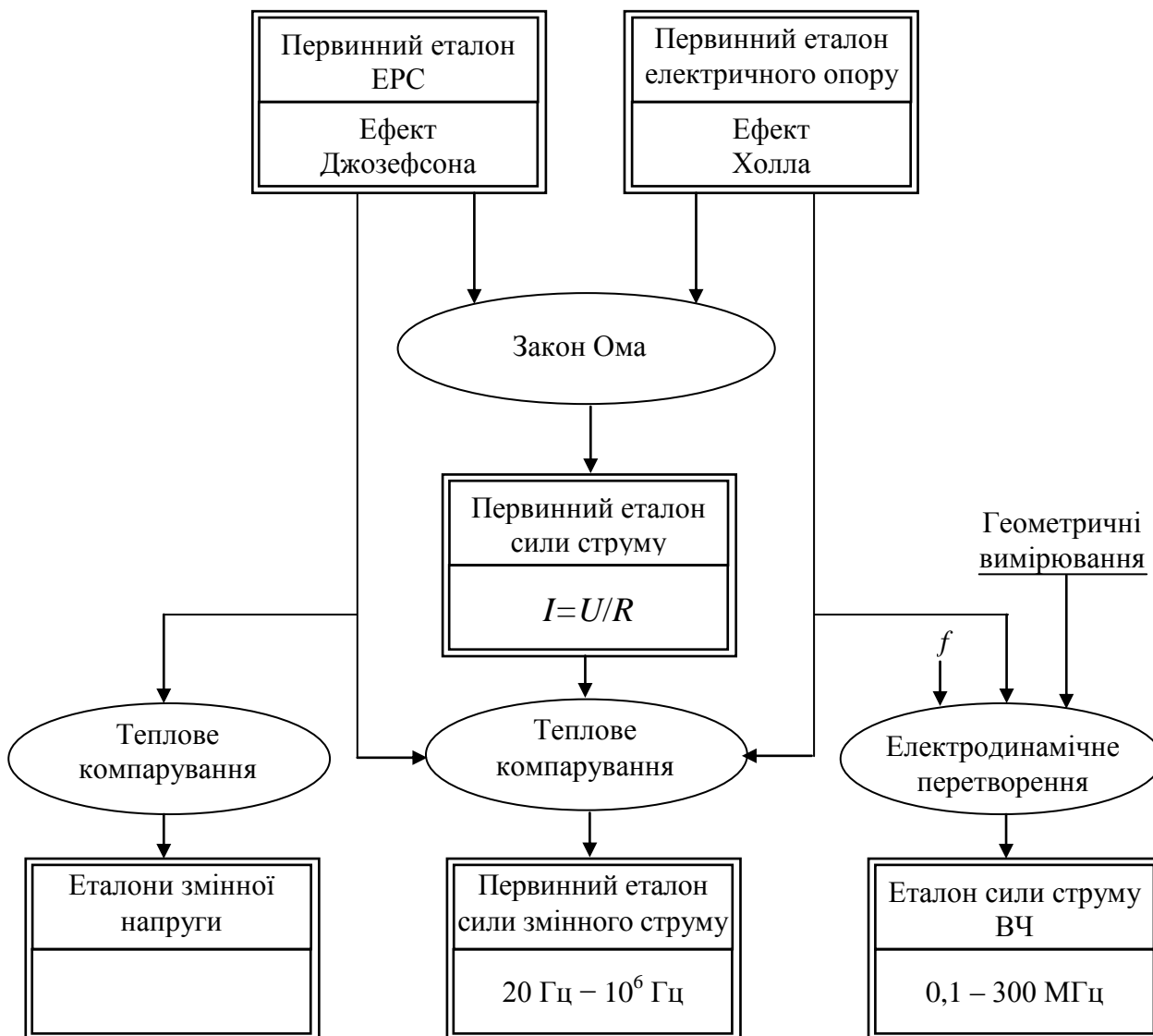


Рис. 5.24. Схема узгодження еталонів ампера

Дещо складніше відбувається відтворення одиниці сили струму на ВЧ методом електродинамічного перетворення, де для визначення сили струму необхідно також обчислювати сталу еталона C_e через геометричні і механічні вимірювання.

5.5. Висновок

Основним методом, на якому базується еталони одиниць змінної напруги і сили змінного струму, є метод теплового компарування, тобто порівняння з напругою або силою постійного струму за еквівалентною тепловою дією.

Домінуючою похибкою компарування при цьому є похибка переходу з постійного струму на змінний або частотна похибка, пов'язана з наявністю у схемах термодіагностичних реактивних елементів і поверхневого ефекту. Тому апаратурна реалізація методу теплового компарування в різних частотних піддіапазонах відрізняється, а основним напрямком метрологічних досліджень при створенні відповідних еталонів є оцінка і мінімізація частотної похибки.

Оптимальним методом, який дозволяє перенести розмір вольт в діапазон високих напруг на постійному і змінному струмі, є метод масштабного перетворення.

Широкі частотний і динамічний діапазони, в яких необхідно вимірювати параметри електричного струму, перш за все напругу, призвели до необхідності створення кількох первинних еталонів вольт.

Методи теплового компарування дозволяють забезпечити простежуваність вимірювання параметрів постійного і змінного струмів до найбільш точних еталонів у галузі електрики (первинного еталона ЕРС на ефекті Джозефсона і первинного еталона електричного опору на квантовому ефекті Холла) і тим самим забезпечити узгодженість розмірів вольт і ампера в частотному і динамічному діапазонах.

Варто також сказати про дослідження щодо використання квантового ефекту Джозефсона для вимірювання змінної напруги і, в перспективі, створення єдиного квантового еталона вольт на постійному і змінному струмі. Концепцію побудови такого еталона в Росії розглянуто в [39]. Суть методу (див. рис. 5.25) полягає в порівнянні змінного синусоїдального сигналу $U \sin \omega t$ з “джозефсонівським” сигналом східчастої форми U_d за допомогою деякого нуля-індикатора (наприклад, СКВИДа*). При цьому проводиться порівняння площин чи, що те ж саме, середньовипрямлених значень порівнюваних сигналів. Опорним сигналом служить сигнал (напруга), відтворений мірою на основі ефекту Джозефсона U_d . Східчастий сигнал U_d може бути отриманий шляхом дискретних відліків з виводів джозефсоновської матриці, розташованих, наприклад, за двоїчним кодом. Різниця напруг (див. вид різницевого сигналу на рис. 5.25) по-

* СКВИД – Від початкових букв англійських слів Superconducting Quantum Interference Device – надпровідний квантовий інтерференційний прилад. Використовується для вимірювань слабких магнітних полів (до 10^{-18} Тл), струмів (до 10^{-10} А) та напруг (до 10^{-15} В) на основі ефекту Джозефсона і явлення квантування магнітного потоку.

дається на вхід СКВИДа, фільтрується, підсилюється, випрямляється на фазочутливому детекторі і надходить на регулятор рівня у вигляді сигналу помилки. При рівності середньовипрямлених значень U_{CB} напруга сигналу помилки дорівнює нулю; для переходу до середньоквадратичних чи амплітудних значень напруги (відповідно до виразів (5.5) $U_{СК} = \pi U_{CB} / \sqrt{8}$, $U_m = \pi U_{CB} / 2$) необхідно застосовувати масштабні перетворювачі напруги.

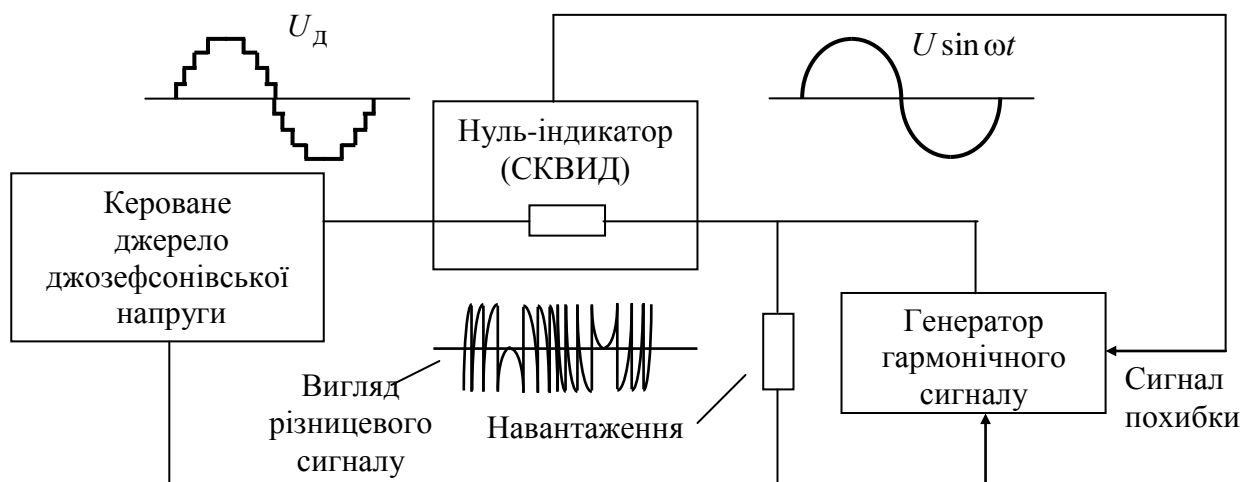


Рис. 5.25. Спрощена схема відтворення змінної напруги

Такий спрощений розгляд уявляється досить ясним, однак практична реалізація даного еталона містить у собі ряд питань. Це створення керованої матриці з безгістерезисними джозефсонівськими переходами, формування східчастого сигналу U_d із заданими параметрами, побудова прецизійного масштабного перетворювача в ряд інших. Проблемою створення еталона змінної напруги на основі ефекту Джозефсона займається ряд метрологічних центрів світу, що володіють технологією створення багатоелементних матриць (РТВ, NIST та ін.).

Відзначимо, що перші результати в цьому напрямку уже є в ряді країн, в тому числі і в Росії.

Роботи в цьому напрямку активно продовжуються.

Контрольні питання

1. На якому методі ґрунтується відтворення розмірів вольту і ампера на змінному струмі, який закон фізики лежить в основі цього методу?
2. Чим відрізняються апаратні реалізації методу відтворення одиниці напруги на низьких, середніх і високих частотах?
3. Як забезпечується єдність вимірювання напруги в усіх частотних і динамічних діапазонах?
4. Чому створюється кілька еталонів одної і тієї ж ФВ, чи не можна обійти-

ся одним?

5. Який метод дозволяє перенести розмір вольты у діапазон високих напруг?

6. Які типові складові похибки мають місце при реалізації методу теплового компарування?

7. Як забезпечується простежуваність еталонів вольты і ампера на змінному струмі до еталонів на квантових ефектах Джозефсона і Холла?

6 ЕТАЛОНИ ПАРАМЕТРІВ ІНТЕНСИВНОСТІ

До параметрів інтенсивності в електрорадіотехніці, окрім напруги і сили струму, відносяться електрична потужність, напруженість електромагнітного поля, спектральна густина потужності шуму. Розглянемо питання забезпечення єдності цих видів вимірювань.

6.1 Еталони одиниці електричної потужності

Електрична потужність – одна з найважливіших фізичних величин в електриці і радіоелектроніці. Хоча потужність вимірюється від постійного струму до оптичного діапазону хвиль, вимоги до цих вимірювань в різних піддіапазонах не рівнозначні.

Велике значення паливно-енергетичного комплексу в економіці будь-якої країни, активний розвиток енергоприладобудування, енергомашинобудування, внутрішнього і зовнішнього енергетичних ринків постійно вимагають підвищення точності і достовірності вимірювання енергетичних величин, насамперед, електричної потужності і енергії на промисловій частоті (50 Гц).

Тому саме в цьому діапазоні частот (як правило від 20 Гц до 2 кГц), де використовується велика кількість і номенклатура засобів вимірювання потужності і енергії (електролічильників), в промислово розвинутих країнах створюють відповідні державні еталони.

У СРСР у 60-і рр. була забезпечена можливість вимірювання електричної потужності з похибкою 0,05 – 0,2 %. У 70-і рр. ця похибка була зменшена до 0,02 – 0,05 %, а наприкінці 80-х рр. був створений державний еталон із НСП $(2-4) \cdot 10^{-5}$ на частотах 45 – 65 Гц і не більш $2 \cdot 10^{-4}$ на частотах до 2,5 кГц. Аналогічний прогрес у вимірюванні енергетичних величин і еталонуванні потужності спостерігається і в інших країнах.

Іншим діапазоном, де вимірювання потужності особливо важливі, є діапазон використання трактів з розподіленими сталими (вище 2-3 ГГц). В цьому діапазоні поняття напруги і струму втрачають сенс, і потужність є основним параметром інтенсивності. Звідси необхідність відповідних еталонів.

Перший еталон потужності ВЧ- і НВЧ-діапазонів у колишньому СРСР був розроблений у 1972 р. у ВНИИМ. Він відтворював одиницю потужності від 10^{-3} до 1 Вт у діапазоні частот 0,03 – 10 ГГц [37]. Надалі були створені ДЕ потужності в сантиметровому діапазоні (частота 2,59 – 37,5 ГГц) [19] і в міліметровому діапазоні (37,5 – 178,6 ГГц) [23].

Розглянемо принцип побудови еталонів потужності в названих діапазонах.

6.1.1 Еталон одиниці потужності змінного струму на промисловій і низькій частотах

Методи і засоби вимірювання електричної потужності істотно відрізняються від методів і засобів вимірювання інших електричних величин. Вони розроблені таким чином, що реальна активна потужність (P), що поглинається в

навантаженні ланцюга і перетворюється в інші неелектричні види потужності (теплову, механічну і т.д.), безпосередньо не впливає на засоби вимірювання потужності (ЗВП), за винятком випадків вимірювання потужності калориметричними методами. На ЗВП, що включається, як правило, у ланцюг між генератором і навантаженням, впливають дві величини: падіння напруги на навантаженні $u(t)$ і струм $i(t)$, що протікає через навантаження. Результатом вимірювання при цьому є середнє за період значення добутку

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = UIK_p, \quad (6.1)$$

де U і I – середньоквадратичне значення напруги і струму; K_p – коефіцієнт потужності.

В окремому випадку, при чисто гармонічних $u(t)$ та $i(t)$ активна потужність визначається як скалярний добуток векторів напруги і струму

$$P = UI \cos \varphi, \quad (6.2)$$

де φ – фазовий кут між векторами \bar{U} і \bar{I} .

Таким чином, ЗВП вимірюють не реальну фізичну величину – активну потужність у навантаженні, а так звану **прохідну** потужність, що приводить до появи характерних для ЗВП похибок вимірювання.

Метрологічні роботи, зв'язані з відтворенням одиниць потужності й енергії, повіркою і калібруванням ЗВП 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. При цьому фіктивна потужність імітує прохідну потужність в умовах, коли реальна потужність взагалі відсутня. Цей шлях виявився найбільш раціональним для рішення метрологічних задач, зокрема, для створення еталона одиниці електричної потужності на промисловій частоті.

Принципи відтворення одиниці потужності повинні відповідати таким умовам:

- можливість відтворення вата з опорою на еталони вольта й ома;
- можливість відтворення одиниці у формі фіктивної електричної потужності.

Існує кілька можливих варіантів побудови еталона:

а) роздільного вимірювання середньоквадратичних значень струму, напруги і кута зсуву фаз між ними з подальшим обчисленням потужності як добутку цих трьох величин. Метод є справедливий, як було сказано вище, при чисто гармонічних формах струму і напруги, крім того, він не є оптимальним за критеріями мінімуму похибки і простоти апаратної реалізації;

б) метод перемножування миттєвих значень струму, що проходить в електричному колі, і напруги, прикладеної до нього (наприклад, за допомогою спеціальних АЦП). Метод є дуже перспективним і вже застосовується в еталонах

деяких країн;

в) метод, що базується на відтворенні малого значення активної потужності (потужності поглинання) і передачі розміру одиниці від потужності поглинання до фіктивної потужності [40].

Останній метод знайшов застосування в еталонах багатьох країн. Розглянемо його докладніше.

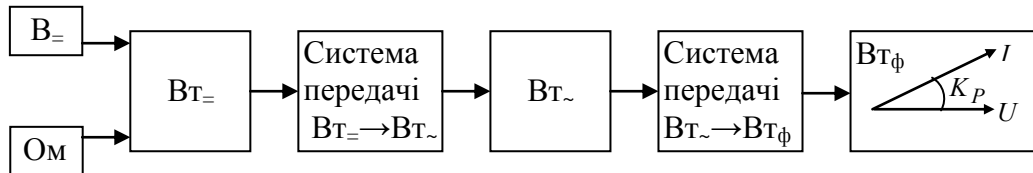


Рис. 6.1. Відтворення одиниці потужності на основі еталонів вольт а й ома

Процес відтворення одиниці потужності на основі еталонів вольт а і ома наведено на рис. 6.1, де $Вт_=_$, $Вт_~$ і $Вт_φ$ – одиниця потужності на постійному струмі, змінному струмі і у формі фіктивної потужності відповідно. Спрощену схему еталона, що ґрунтується на методі «в» (фіктивної потужності), наведено на рис. 6.2.

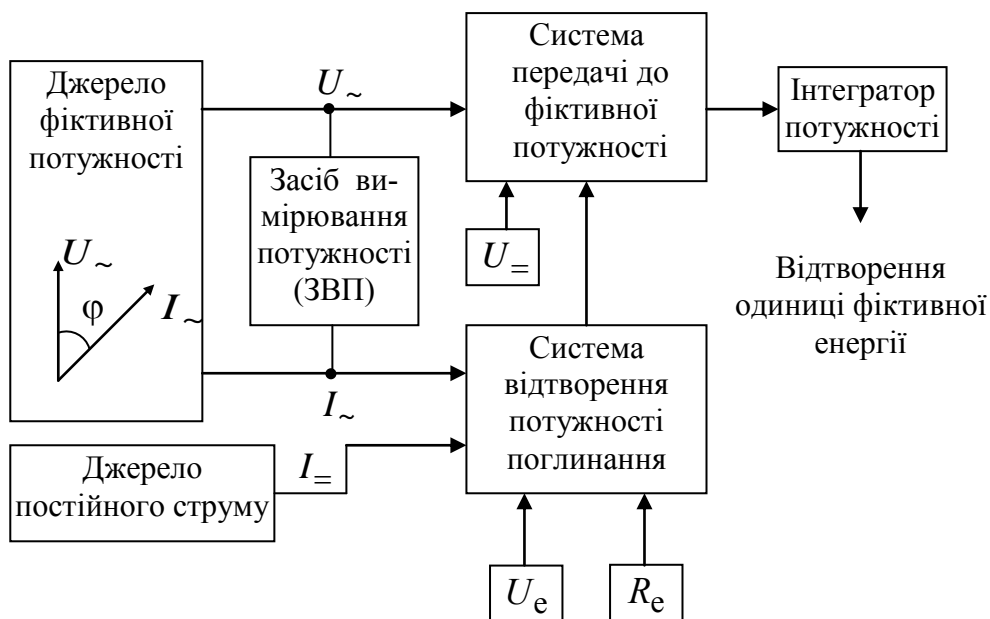


Рис. 6.2. Спрощена структурна схема еталона одиниці потужності

Розглянемо окремі елементи цієї схеми. Джерело фіктивної потужності (ДФП) являє собою два окремих джерела струму і напруги з регулюванням фазового зсуву між ними (рис. 6.3).

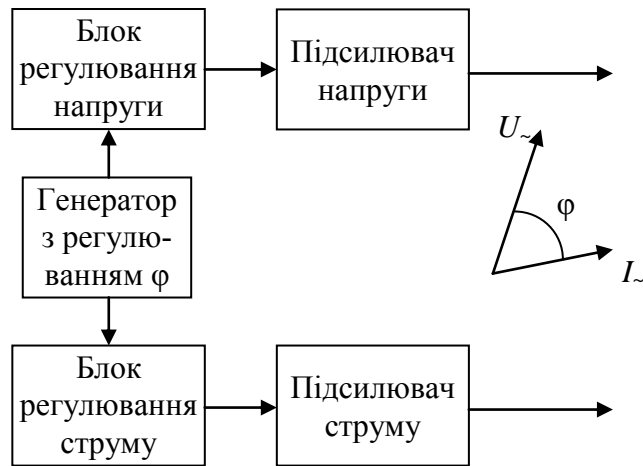


Рис. 6.3. Джерело фіктивної потужності

Систему відтворення потужності поглинання (СВПП) і передачі розміру одиниці в область фіктивної потужності наведено на рис. 6.4.

Якщо через СВПП протікає змінний струм I_{\sim} , то в його активному елементі – зразковому резисторі R_{Π} поглинається активна потужність $P_{\Pi} = I_{\sim}^2 R_{\Pi}$. При цьому I_{\sim} вимірюється за допомогою термоперетворювача ТП шляхом компарування з постійним струмом, а R_{Π} – відомий опір, що простежується до еталона ома.

Таким чином, у резисторі R_{Π} відтворюється реальна активна потужність невеликого розміру (0,1 – 10 Вт), яка визначена через еталони вольт (або ампера) і ома на постійному струмі.

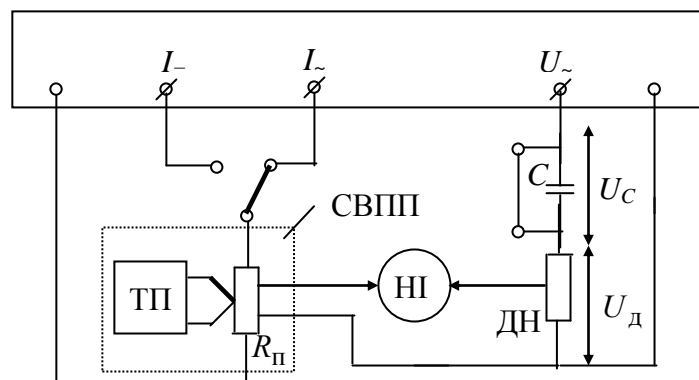


Рис. 6.4. Система відтворення одиниці фіктивної потужності

Падіння напруги U_{Π} на резисторі R_{Π} за допомогою селективного нуля-індикатора (НІ) порівнюється з вихідною напругою $U_{\text{д}}$ діляника напруги (ДН), до якого прикладено напругу U_{\sim} від ДФП (див. рис. 6.3). При цьому у варіанті $K_p=1$ конденсатор C “закорочено”. Нульові показання НІ, що відповідають рі-

вності $U_{\Pi} = U_{\text{д}}$, забезпечуються шляхом регулювання коефіцієнта ділення $K_{\text{д}}$ і кута зсуву фаз φ між напругою і струмом. При синусоїдальних U_{\sim} і I_{\sim} і безреактивних R_{Π} і ДН напруга на затискач “ U_{\sim} ” ДФП $U_{\sim} = I_{\sim} R_{\Pi} K_{\text{д}}$, а фіктивна потужність, відтворена на затискач “ U_{\sim} ” і “ I_{\sim} ” ДФП, буде дорівнювати потужності поглинання у СВПП, помноженої на $K_{\text{д}}$:

$$P_{\text{ф}} = P_{\Pi} K_{\text{д}} \cdot \quad (6.3)$$

Для відтворення фіктивної потужності при $K_p < 1$ використовується RC -навантаження. У ланцюг напруги вводиться конденсатор C (рис. 6.4), значення ємності якого встановлюється в залежності від необхідного K_p , опору дільника $R_{\text{дн}}$ і частоти:

$$C = \frac{1}{\omega R} \frac{K_p}{\sqrt{1 - K_p^2}} \cdot$$

Таким чином, відтворення фіктивної потужності $P_{\text{ф}}$ в обох випадках зводиться до відтворення реальної потужності поглинання P_{Π} і визначення коефіцієнта ділення дільника напруги ДН. Як уже було сказано вище, P_{Π} устанавлюється методом компарування з потужністю постійного струму. Коефіцієнт ділення $K_{\text{д}}$ визначається відомими методами або на постійному струмі, або на змінному за допомогою еталонного індуктивного дільника.

Основними складовими НСП відтворення одиниці потужності є [40]:

- похибка відтворення потужності поглинання (куди входять похибки мір постійної напруги, опору і термокомпаратора);
- похибка визначення коефіцієнта ділення ДН;
- похибка передачі розміру одиниці від поглинутої до фіктивної потужності (визначається кутовими похибками ДН, конденсатора і спотвореннями форми напруги).

Еталони (рис. 6.5), побудовані на основі цього метода, мають такі типові характеристики:

діапазон вимірювань, Вт	$0,01 - 6 \cdot 10^3$;
НСП (θ_0)	$(2 - 5) \cdot 10^{-5}$;
СКВ (S_0)	$(5 - 10) \cdot 10^{-6}$.

В Україні також створено державний еталон потужності, що працює в діапазоні частот від 40 Гц до 1 кГц. Еталон відтворює одиницю потужності в динамічному діапазоні $0,01 - 6 \cdot 10^3$ Вт, його НСП θ_0 на промисловій частоті становить $7 \cdot 10^{-5}$, СКВ $S_0 \approx 1 \cdot 10^{-5}$.

Крім державного первинного еталона, в економічно розвинутих країнах створюється еталонна база в даній області, що включає до себе ряд підсистем, які забезпечують відтворення одиниці електричної енергії – джоуля, а також

передачу розмірів одиниць різним видам одно- і трифазних засобів вимірювання потужності й енергії, еталони передавання, у тому числі транспортабельні, а також ряд робочих еталонів різного рівня .

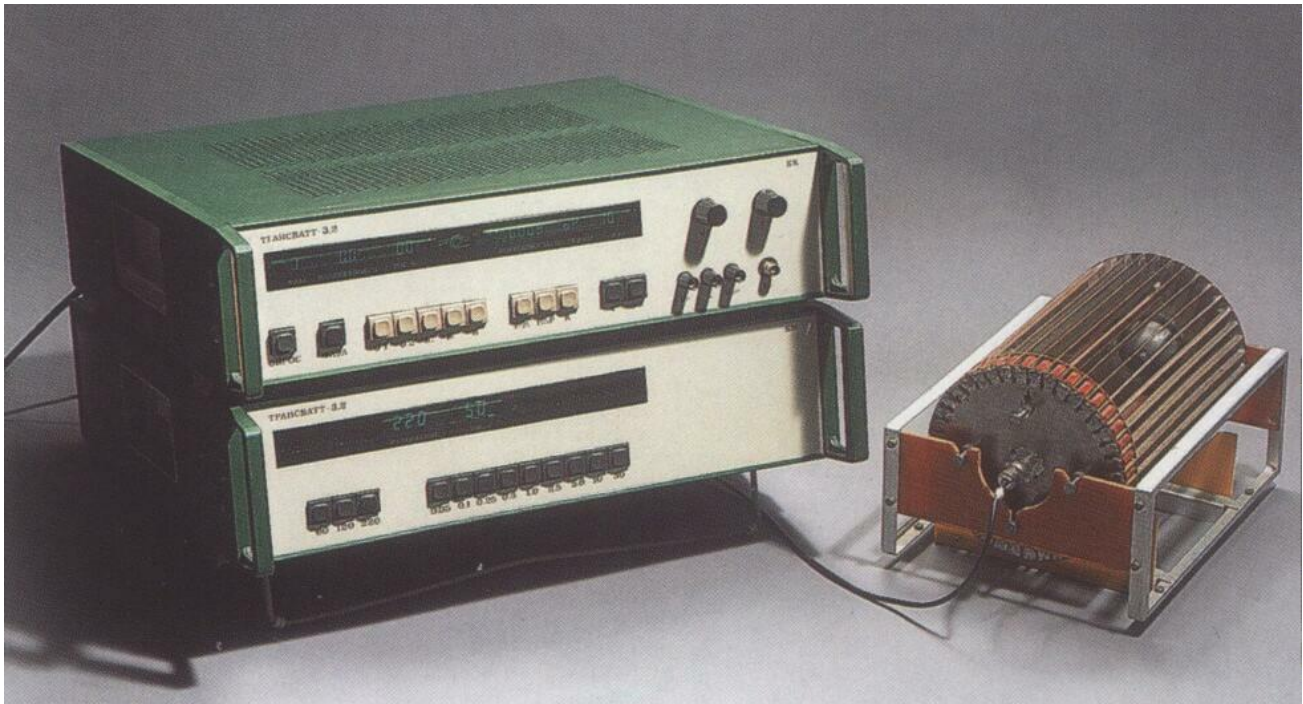


Рис. 6.5. Первинний еталон одиниці електричної потужності в діапазоні частот 40 – 2500 Гц

6.1.2 Еталони одиниці потужності електромагнітних коливань ВЧ- і НВЧ- діапазонів

Якщо точні вимірювання потужності на промисловій частоті дуже важливі для енергетики і комерційних розрахунків при торгівлі електроенергією, то у ВЧ і особливо НВЧ-діапазонах потужність є основним параметром інтенсивності. Звідси важливість відповідних еталонів.

Хоча тракти передачі коливань у різних піддіапазонах частот суттєво відрізняються (коаксіальні, хвилеводні різних перетинів), що приводить до різних конструктивних рішень багатьох вузлів еталона, однак всі еталони потужності мають єдині фізичні принципи. У їхній основі знаходиться закон збереження енергії, а саме – заміщення вимірюваної потужності ВЧ- чи НВЧ- випромінювання відомою потужністю постійного струму [23, 28].

Загальною для всіх еталонів є і їхня структура. Кожний еталон включає джерело НВЧ-випромінювання, еталонний вимірювач потужності, засіб атестації еталона, компаратор, джерело постійного струму і прецизійні засоби вимірювання його потужності (рис. 6.6). Найвища точність відтворення одиниці потужності може бути досягнута при умовах, максимально наближених до деякої ідеальної моделі. Виходячи з цієї вимоги еталон відтворює одиниці потужності

монохроматичного електромагнітного випромінювання, що поширюється від генератора без відбиття в нескінченному однорідному хвилеводі стандартного розміру.

Динамічний діапазон еталонів потужності більшості країн становить 10^{-3} – 10^{-2} Вт. Вибір цього діапазону пояснюється такими міркуваннями. Діапазон потужностей робочих приладів простирається від 10^{-6} до 10^4 Вт середньої потужності і від 10^{-15} до 10^8 Вт потужності в імпульсі. Тому природно мати еталон з діапазоном, близьким до середини динамічного діапазону робочих ватметрів.

Як еталонні ватметри у складі еталонів застосовують ватметри поглинутої або прохідної потужності, а принцип вимірювання полягає в порівнянні всієї поглинутої ватметром потужності (або її частини) з потужністю постійного струму, що вимірюється за допомогою прецизійних ЗВТ напруги й опору. Отже, як і в еталоні потужності промислової частоти, ват на ВЧ чи НВЧ “народжується” на базі еталонів ЕРС і електричного опору. На практиці порівняння потужності НВЧ із потужністю постійного струму здійснюється шляхом перетворення тієї й іншої в теплову енергію і порівняння цих енергій, тобто методом теплового компарування. В якості термоперетворювача (ТП) застосовують термістори, болометри, терморезистори.

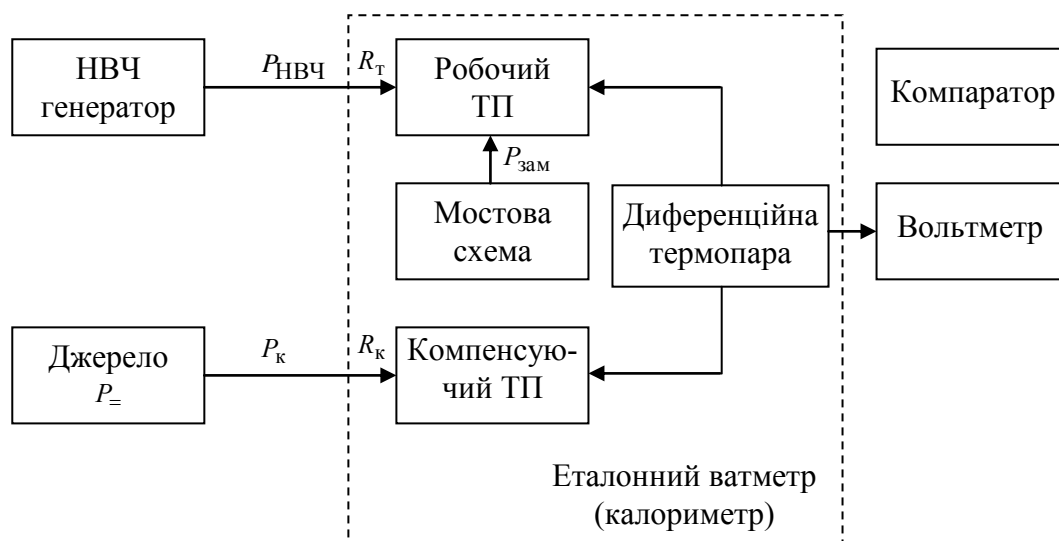


Рис. 6.6. Структурна схема еталона потужності ВЧ і НВЧ

Вимірювання потужності постійного струму (потужності заміщення) здійснюється за допомогою вимірювальних блоків, які є автоматичними мостами з засобами вимірювання напруги й опору.

В основу компараторів усіх еталонів покладено принцип ділення потужності за допомогою спрямованого відгалужувача з допоміжним ватметром у боковому плечі. Такий компаратор разом із джерелом сигналу дозволяє створити калібрований генератор сигналу для передачі розміру одиниці від еталонного ватметра до засобів вимірювань, що повіряються.

Еталонні ватметри однотипні за складом і принципом дії для всіх трактів. Вони складаються з робочого термоперетворювача, моста постійного струму і

пристрою атестації. При подачі на ТП НВЧ потужності ТП нагрівається, що викликає зміну його опору постійному струму R_T . Оскільки ТП включений в одне з пліч моста, який автоматично підтримує рівновагу шляхом регулювання потужності постійного струму (заміщення) $P_{зам}$, зміна цієї потужності дає можливість визначати поглинуту термоперетворювачем потужність НВЧ $P_{НВЧ}$.

З фізичних міркувань ясно, що не вся потужність, що падає на вхід ТП, поглинається. Частина потужності може розсіятися в інших елементах, частина – відбитися. Крім того, відомо, що для зміни опору ТП на те саме значення при довжинах хвиль λ , порівнянних з довжиною болометра, потрібні різні потужності $P_{зам}$ і $P_{НВЧ}$. Тому еталонний ватметр характеризують калібровочним коефіцієнтом K_e , який зветься також коефіцієнтом ефективності, а потужність

$P_{НВЧ}$, що падає на вхід ТП, розраховують за формулою $P_{НВЧ} = \frac{P_{зам}}{K_e}$.

Похибка вимірювання потужності еталонним ватметром визначається, таким чином, похибкою визначення $P_{зам}$ і K_e . Перша з цих похибок може бути зведена до досить малого значення (0,01 – 0,03 %), друга є домінуючою. Тому визначення K_e є центральною задачею метрологічного дослідження всіх еталонів потужності ВЧ і НВЧ.

Для вимірювання K_e в еталонах потужності застосовують спеціальні пристрої атестації, що ґрунтуються на калориметричному методі. Один із варіантів конструкції калориметра наведено на рис. 6.7.

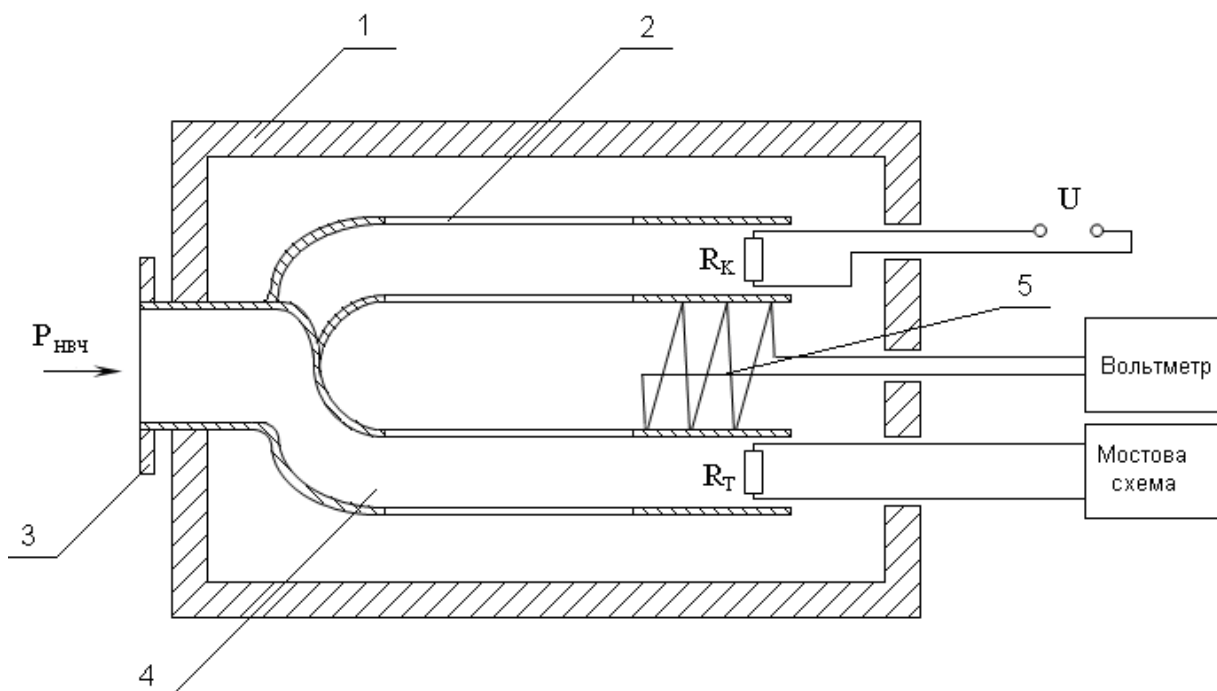


Рис. 6.7. Конструкція калориметра еталона потужності ВЧ і НВЧ:
 1 – корпус; 2 – компенсуючий відрізок хвилеводу; 3 – фланець;
 4 – робочий відрізок хвилеводу; 5 – диференційна термопара

За відсутності НВЧ-потужності мостова схема, в одне плече якої включено робочий термоперетворювач R_T , збалансована. При подачі $P_{\text{НВЧ}}$ на робочий ТП останній додатково нагрівається, змінюється його опір, і міст виходить з рівноваги. Якщо міст є автоматичним (що має місце для сучасних еталонів), потужність джерела постійного струму змінюється на значення, необхідне для відновлення рівноваги (потужність заміщення $P_{\text{зам}}$).

Оскільки частина НВЧ-потужності, як уже було сказано вище, витрачається на нагрівання конструкції (позначимо P_K), рівняння теплового балансу має вигляд

$$P_{\text{НВЧ}} = P_{\text{зам}} + P_K .$$

Оскільки

$$P_{\text{НВЧ}} = \frac{P_{\text{зам}}}{K_e} ,$$

то

$$K_e = \frac{P_{\text{зам}}}{P_{\text{зам}} + P_K} = \frac{1}{1 + \frac{P_K}{P_{\text{зам}}}} ,$$

тобто для визначення K_e необхідно вимірювати P_K і $P_{\text{зам}}$. Потужність $P_{\text{зам}}$ вимірюється за допомогою пристроїв, що входять у мостову схему, а для вимірювання P_K служить калориметр (рис. 6.7). У цій конструкції в один із відрізків хвилеводу включено робочий ТП R_T , в іншій – ідентичний йому компенсуючий ТП R_K . Між відрізками хвилеводу встановлюється диференційна термопара, що перетворює різницю температур між хвилеводами в термо-ЕРС, яка реєструється вольтметром, тобто фактично вимірює величину, пропорційну P_K . Таким чином, вольтметр у ланцюзі термопари можна проградувати у значеннях потужності. Однак точніше вимірити P_K можна, подаючи на компенсуючий ТП R_K потужність постійного струму до вирівнювання температур хвилеводів, тобто до одержання нульового струму в ланцюзі термопари.

Експериментальне вивчення і теоретичний аналіз похибок показали, що похибки вимірювання K_e термоперетворювачів еталонних ватметрів (з урахуванням похибки неузгодженості) у коаксіальних трактах можуть бути знижені до 10^{-3} на частотах до 1 ГГц, до $2 \cdot 10^{-3}$ – на частотах до 3 ГГц і до $3 \cdot 10^{-3}$ – до 10 ГГц. У хвилеводних трактах ця похибка становить $(1-3) \cdot 10^{-3}$, у міліметровому діапазоні – до $1 \cdot 10^{-2}$.

Основні метрологічні характеристики державних еталонів Росії (рис. 6.8) і України (рис. 6.9) наведено в табл. 6.1 [23].

Ці характеристики відповідають кращим закордонним еталонам потужності НВЧ, про що свідчать численні міжнародні звірення еталонів.

Однак настільки високу точність відтворення потужності не вдається зберегти при передачі розміру одиниці від ДЕ підлеглим засобам вимірювання. Це зв'язано, головним чином, з похибкою через неузгодженість, тобто через наяв-

ність коефіцієнтів відбиття виходу генератора НВЧ, входів еталонного ватметра і ватметра, що повіряється. Дослідження показують, що при прийнятті всіх заходів для мінімізації цієї похибки вторинні і робочі еталони можуть градуюватися на ДЕ з похибкою 0,5 – 1,0 % – у діапазоні до 37,5 ГГц, з похибкою 1,0 – 1,5 % – у діапазоні 37,5 – 178,6 ГГц.

Таблиця 6.1

Основні метрологічні характеристики державних еталонів потужності ВЧ і НВЧ Росії й України

Характеристики	Росія	Україна		
		37,5–3,57	53,57–8,33	78,33–178,6
Діапазон частот, ГГц	0,03 – 37,5	37,5–3,57	53,57–8,33	78,33–178,6
Вид тракту (перетин, мм)	Коаксіал, хвилевод	Хвилевод 5,2x2,6	Хвилевод 3,6x1,8	Хвилевод 2,4x1,2; 1,6x0,8
Межі відтворюваної потужності, мВт	1 – 100	3 – 10	2 – 10	1 – 10
НСП	$(0,1 – 0,3) \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
СКВ	$0,2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$



Рис. 6.8. Калориметричний компаратор для частот 0,03 – 37,5 ГГц

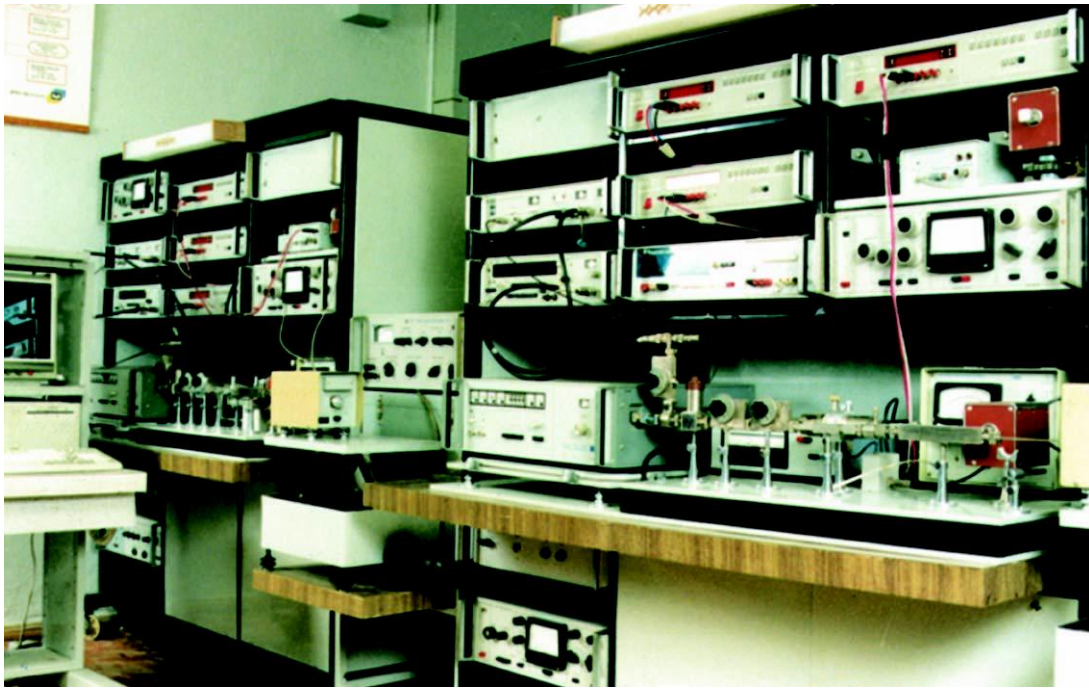


Рис. 6.9. Первинний еталон потужності електромагнітних коливань у діапазоні 37,5 –178,6 ГГц

6.2 Еталони одиниць напруженості електромагнітного поля

6.2.1. Загальні положення

Вимірювання напруженості електромагнітних полів важливі при вивченні питань розповсюдження радіохвиль, визначенні параметрів антен різного призначення, оцінці зон покриття радіозв'язком і телебаченням, при визначенні параметрів електромагнітної сумісності і біологічного впливу полів на людину. Крім радіоелектроніки, техніка вимірювання параметрів електромагнітних полів застосовується в транспорті, метрології, геофізиці, медицині й інших областях науки і техніки.

Як відомо, перенос енергії електромагнітним полем однозначно описується за допомогою вектора Умова-Пойнтінга (рис. 6.10)

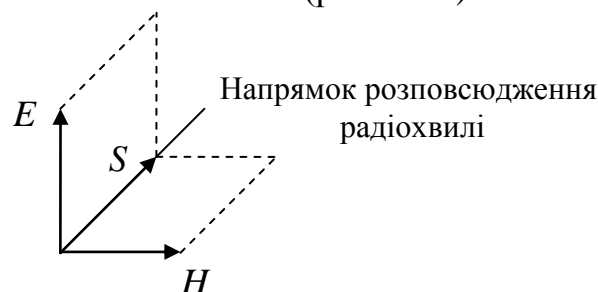


Рис. 6.10. Вектор Умова-Пойнтінга

$$\dot{S} = [\dot{E} \cdot \dot{H}],$$

де \dot{S} – густина потужності чи густина потоку енергії (Вт/м²); \dot{E} – напруженість

електричного поля (В/м); \dot{H} – напруженість магнітного поля (А/м), тобто електромагнітне поле у вільному просторі визначається векторами \dot{E} і \dot{H} .

У плоскій лінійно-поляризованій хвилі вектори зв'язані співвідношенням

$$E = 120\pi H, \quad (6.4)$$

де 120π – хвильовий опір вільного простору (Ом).

На практиці при $f < 30$ МГц ($\lambda > 10$ м) умови існування плоскої хвилі і співвідношення (6.4) не виконуються. Тому в цьому діапазоні створюють окремі еталони напруженості електричного і напруженості магнітного полів.

Для частот понад 30 МГц умови “вільного простору”, в якому існує плоска хвиля, в основному виконуються, співвідношення (6.4) справедливо, тому в цьому діапазоні створюють тільки один еталон, як правило, напруженості електричного поля.

Перші еталони електромагнітного поля (ЕМП) були створені в США. Метою їхнього створення було забезпечення калібрувальної служби для комерційних вимірювань напруженості поля при випробуваннях ефективності антен радіостанцій і визначенні зон стійкого зв'язку у діапазоні частот 30-300 МГц, виділеного для частотно-модульованого і телевізійного зв'язку. Робота виконувалася Центральною лабораторією розповсюдження радіохвиль Національного бюро стандартів США (нині NIST).

Задачі, що довелося вирішувати творцям перших еталонів ЕМП, не втратили актуальності і дотепер. Одним з таких питань є питання про те, який метод є оптимальним при створенні еталонів ЕМП: “еталонної антени” (еталон – вимірювач) чи “еталонного поля” (еталон – джерело).

Метод еталонного поля полягає в збудженні бажаної складової поля, розрахунку значення напруженості по розмірах і формі передавальної антени, розподілу струмів у ній, а також урахуванні границь області, в якій утворюється еталонне поле (рис. 6.11, а). Метод еталонної антени (вимірювача) базується на вимірюванні струму чи напруги, що збуджено в приймальній еталонній антені, і обчисленні напруженості з урахуванням форми, розмірів і орієнтації цієї антени (рис. 6.11, б).

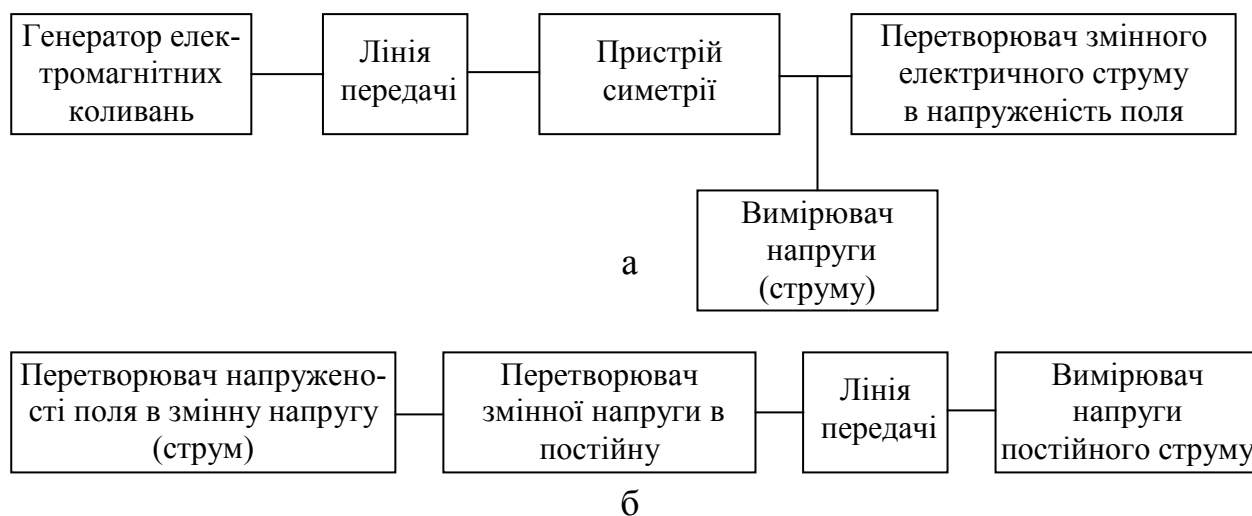


Рис. 6.11. Структурні схеми реалізації методів еталонного поля (а) і еталонної антени (б)

При виборі методу побудови еталона (еталонної антени чи еталонного поля) вирішальними є такі обставини: у діапазоні частот до 30 МГц можна створити поля, локалізовані в обмеженій області простору і захищені від дії навколишніх предметів. У цьому діапазоні справедливі закони квазістаціонарних полів, оскільки розміри антен і обсяги полів значно менше довжини хвилі. У діапазоні частот вище 30 МГц створити поле з відомою напруженістю значно складніше через необхідність враховувати хвильовий характер поширення поля, вплив навколишніх предметів і т.і. Тому в цьому діапазоні звичайно використовується метод еталонної антени.

Розглянемо еталони напруженості полів на прикладі еталонів, створених у свій час у СРСР, потім модернізованих у Росії (ВНИИФТРИ). За своїми характеристиками вони відповідають світовому рівню в цій області.

6.2.2 Еталон напруженості електричного поля на частотах до 30 МГц

В основі еталона лежить метод еталонного поля [23]. Еталонне поле створюється між обкладинками плоского конденсатора, що відіграє роль перетворювача змінної напруги в напруженість електричного поля. Відстань між пластинами, їхня площа і форма вибираються такими, щоб забезпечити зону однорідного поля достатнього розміру для розміщення антен, що калібруються. Електричне поле конденсатора може бути розраховане з достатньою точністю. Відомо, що напруженість поля між нескінченними пластинами плоского конденсатора дорівнює

$$E = \frac{U}{d}, \text{ В/м,}$$

де U – напруга між пластинами; d – відстань між ними.

Для конденсатора обмежених розмірів цей вираз є справедливим лише для ділянок поля, досить віддалених від краю пластин конденсатора, де поле можна вважати однорідним. Для більш точних розрахунків користуються формулою

$$E = \gamma_l \gamma_f \frac{U}{d},$$

де γ_l – коефіцієнт, що враховує так званий крайовий ефект і дозволяє приводити показання термовольметра, що вимірює напругу на краях пластин, до центра, де існує область еталонного поля; γ_f – коефіцієнт, що враховує частотну залежність показань вимірювача напруги U (термовольметра). Даний коефіцієнт характеризує нееквівалентність теплової дії постійного і змінного струму, про що докладно говорилося при розгляді еталона змінної напруги.

Спрощену структурну схему еталона наведено на рис. 6.12.

Еталонний конденсатор збуджується шляхом подачі на його пластини ВЧ сигналу генератора через трансформатор симетрії. Напруга U на пластинах конденсатора вимірюється термовольтметром (термоперетворювач з прецизійним вольтметром постійного струму). Частотний коефіцієнт термовольметра

γ_f визначається за допомогою чвертьхвильової лінії і зразкового вольтметра. Значення γ_l знаходять експериментально шляхом вимірювання розподілу напруженості поля конденсатора відносно його центра (за допомогою допоміжного вольтметра з ковзними контактами або сферичної антени). Відстань d між пластинами в еталоні Росії становить 0,5 м, її незмінність контролюється спеціальним нутроміром.

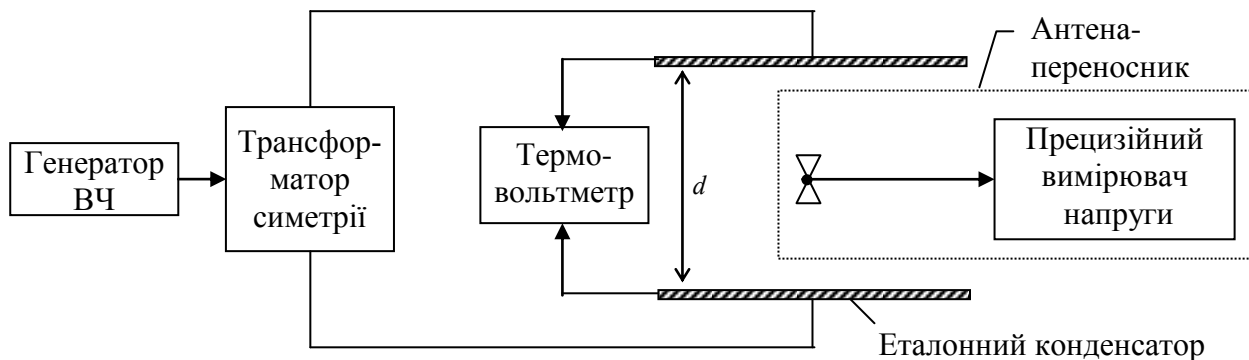


Рис. 6.12. Структурна схема еталона напруженості електричного поля

Діаметр пластин конденсатора вибирається виходячи з мінімуму крайових ефектів у зоні розміщення антени-переносника, про яку мова йтиме нижче. В еталоні Росії (рис. 6.12, 6.13) він становить 1 м.



Рис 6.13. Державний спеціальний еталон одиниці напруженості електричного поля на основі екранованого конденсатора

Невилучена систематична похибка відтворення напруженості поля в центрі конденсатора включає такі складові:

- похибку визначення коефіцієнтів γ_f і γ_l (близько $1 \cdot 10^{-2}$ і $5 \cdot 10^{-3}$ відповідно);
- похибку термовольметра (близько $5 \cdot 10^{-3}$);
- похибку визначення значення d (близько $2 \cdot 10^{-4}$);
- похибку, пов'язану з впливом навколишніх предметів (близько $2 \cdot 10^{-3}$) і невідповідністю конденсатора ідеальній моделі (близько $1 \cdot 10^{-3}$).

Результуюча НСП при довірчій імовірності 0,99 становить приблизно $1 \cdot 10^{-2}$ (на частоті 30 МГц). На більш низьких частотах НСП має тенденції до зменшення, СКО оцінюється значенням $5 \cdot 10^{-3}$. Діапазон напруженості електричного поля становить 0,2 – 20 В/м.

Передача розміру одиниці напруженості вторинному і робочому еталонам здійснюється за допомогою згаданої вище антени-переносника. Вона являє собою настроєний у резонанс електричний диполь у сукупності з прецизійним вимірювачем напруги (термовольтметром).

Передача розміру одиниці здійснюється на кількох фіксованих частотах (п'яти – семи), причому антени-переносники виготовляються на кожен з цих частот. Процедура передачі полягає у використанні методу заміщення. Антену розташовують у полі конденсатора первинного еталона і відзначають показ її термовольметра. Потім антену-переносник поміщають у поле еталона, що атестується, і регулюванням напруги останнього встановлюють ті ж показання термовольметра, що були у полі первинного еталона. При цьому напруженості полів обох еталонів рівні.

Передача розміру одиниці супроводжується такими похибками:

- частотною похибкою термовольметра (близько $3 \cdot 10^{-3}$);
- неточністю установки антени-переносника у вимірюване поле ($3 \cdot 10^{-3}$) і нестабільністю антени за час вимірювання ($2 \cdot 10^{-3}$);
- впливом антени-переносника на поле, у яке вона встановлена (порядку $1 \cdot 10^{-3}$).

Сумарна похибка (СКВ) передачі оцінюється значенням $5 \cdot 10^{-3}$.

6.2.3 Еталон напруженості електричного поля в діапазоні вище 30 МГц

У діапазоні частот вище 30 МГц для відтворення одиниці напруженості використовується метод еталонної антени. В основі вибору типу антени лежать такі критерії: близькість характеристик реальної конструкції до розрахункової моделі; простота зв'язку вимірюваної електричної величини на виході антени (струму або напруги) з параметром електричного поля, що вимірюється, гарні поляризаційні показники. В еталоні Росії як антену використовують напівхвильовий диполь [23]. Напруженість електричного поля встановлюється на основі розрахункових параметрів диполя, а також вимірювання напруги (струму) в диполі і його опору.

Спрощену структурну схему еталона наведено на рис. 6.14.

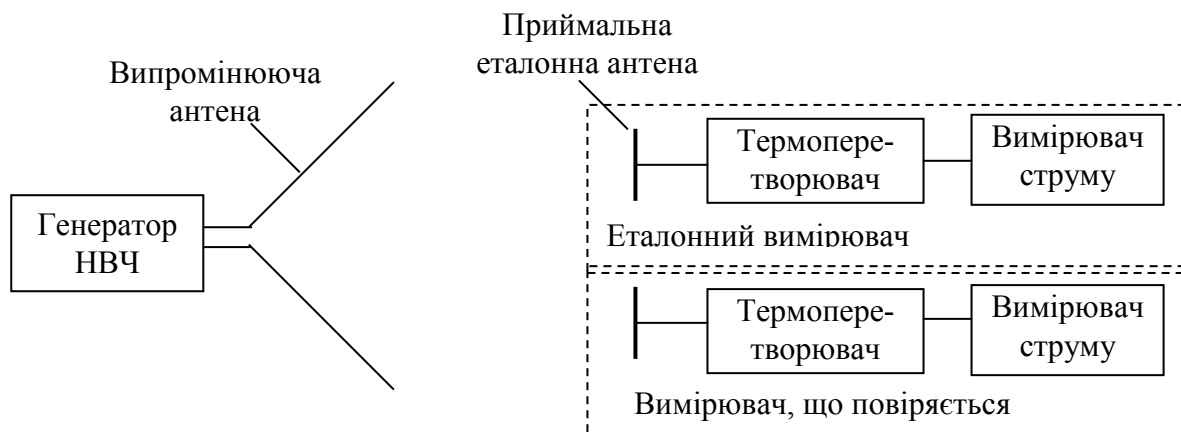


Рис. 6.14. Структурна схем еталона напруженості електричного поля, що реалізує метод еталонної антени

Випромінююча антена збуджується генератором НВЧ. До складу еталонного вимірювача входять дипольні антени з термоперетворювачем (типу ТВБ), що працюють на ряді фіксованих частот у діапазоні від 30 до 1000 МГц, і вимірювач постійного струму. Крім того, до складу еталона входять допоміжні випромінювачі і засоби вимірювання частотних коефіцієнтів перетворювачів.

Відтворення одиниці напруженості електричного поля (В/м) ґрунтується на застосуванні рівняння

$$E = \frac{I(R_{\Sigma} + R_T)}{L_d} \alpha, \quad (6.5)$$

де I – високочастотний струм в антені, який вимірюється за допомогою термоперетворювача; R_{Σ} – опір випромінювача еталонної антени; R_T – опір термоперетворювача; L_d – діюча довжина антени; α – частотний коефіцієнт еталонної антени.

Вимірювання напруженості здійснюється еталонними антенами на відстанях і висотах, кратних напівхвилі випромінювання $n \frac{\lambda}{2}$, де $n = 2, 3, \dots$. Еталонні антени встановлюють і орієнтують за допомогою спеціальних координатних пристроїв.

Вимірювання струму I здійснюється методом заміщення відомим значенням постійного струму на виході термоперетворювача (аналогічно еталону змінного струму). Одночасно вимірюється значення R_T при даному струмі. Частотний коефіцієнт α термоперетворювача вимірюють за допомогою каліброваного болометричного перетворювача (який має дуже малу частотну залежність до частоти 1000 МГц), а коефіцієнт α для еталонної антени з термоперетворювачем у цілому визначають розрахунково-експериментальним способом з урахуванням R_{Σ} і R_T . Діюча довжина L_d також визначається розрахунково-експериментальним методом.

НСП еталона обумовлена такими складовими:

- похибкою визначення коефіцієнта α ;
- похибками визначення L_d і R_Σ , а також неточністю настройки антени в резонанс;
- взаємним впливом передавальної і приймальної антен, а також навколишніх предметів і Землі.

Оцінка НСП в еталоні Росії становить $(1,5 - 2) \cdot 10^{-2}$, СКВ – $5 \cdot 10^{-3}$.

При передачі розміру одиниці рівень сигналу на виході генератора підтримується постійним, а еталонний вимірювач напруженості замінюється на вимірювач, що повіряється. Різниця показань останнього і значення E , розрахованого за формулою (6.5), являє собою похибку вимірювача, що повіряється (або поправку до його показань). Еталонна антена і антена вимірювача, що повіряється, встановлюються й орієнтуються за допомогою спеціальних координатних пристроїв. Неідентичність антен і розбіжність їхньої установки стосовно випромінюючої антени – джерела домінуючих складових похибок передачі розміру одиниці. СКВ передачі в еталоні Росії оцінюється в $(1-2) \cdot 10^{-2}$.

В 1994 р. у Росії затверджено єдиний комплекс еталонів одиниці напруженості електричного поля в діапазоні частот 0,0003 – 1000 МГц (рис. 6.15), до складу якого входять три установки:

- на базі плоского конденсатора;
- на базі чотирьохпровідної лінії;
- на базі біконичних антен.

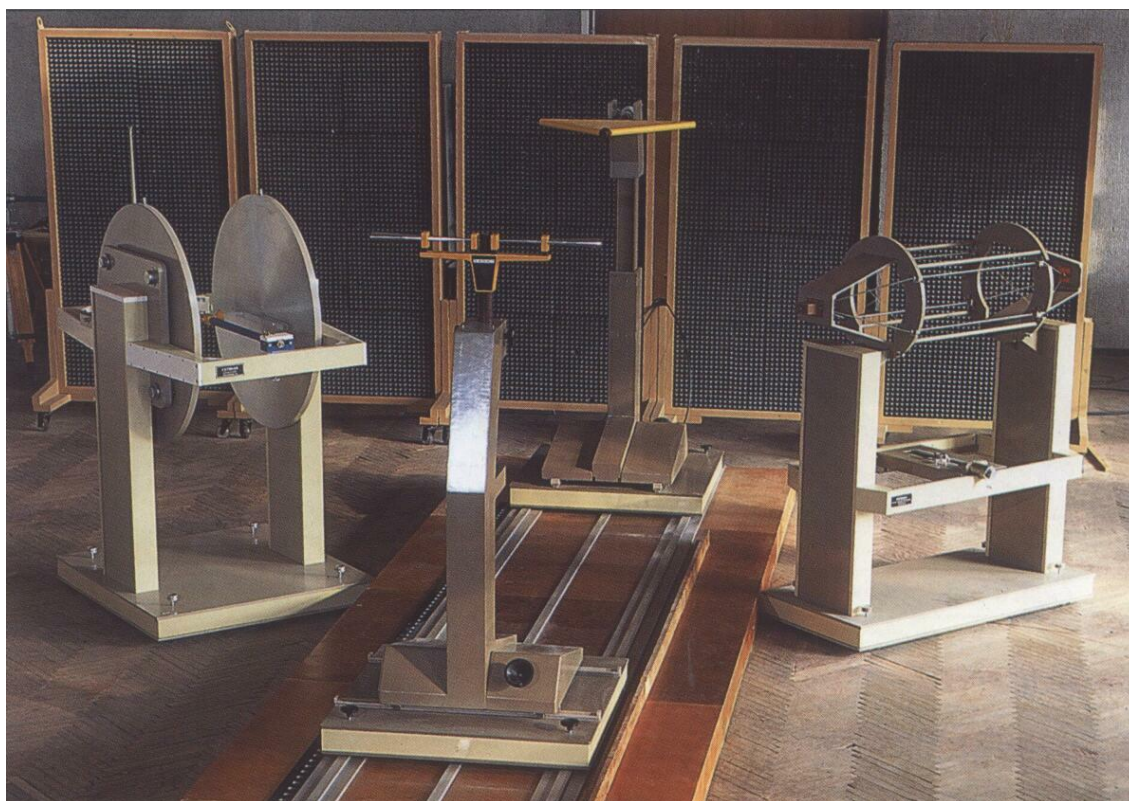


Рис. 6.15. Державний спеціальний еталон напруженості електричного поля в діапазоні частот 0,0003 – 1000 МГц

Еталон має такі метрологічні характеристики:	
діапазон вимірювань, В/м	0,2 – 10;
СКВ (S_0)	$0,5 \cdot 10^{-2}$;
НСП (θ_0)	$1,5 \cdot 10^{-2}$.

6.2.4 Еталон напруженості магнітного поля в діапазоні до 30 МГц

При побудові даного еталона використовується метод еталонного поля. В еталоні Росії [23] квазістатичне еталонне магнітне поле створюється за допомогою випромінюючої рамкової плоскої кільцевої симетричної антени з радіусом R_1 . Периметр антени значно менше довжини хвилі, тому можна знехтувати хвильовим характером струму і вважати його амплітуду і фазу постійними у всіх точках кільця. Провід, що утворює кільцеву рамку, вважається нескінченно тонким. Структурну схему еталона наведено на рис. 6.16.

Значення нормальної складової напруженості магнітного поля (в А/м) у точці розташування індикаторної антени розраховується за формулою

$$H = \frac{IS}{2\pi L}, \quad (6.6)$$

де I – діюче значення струму в передавальній антені; S – площа еталонної антени; L – відстань між еталонною й індикаторною антенами.

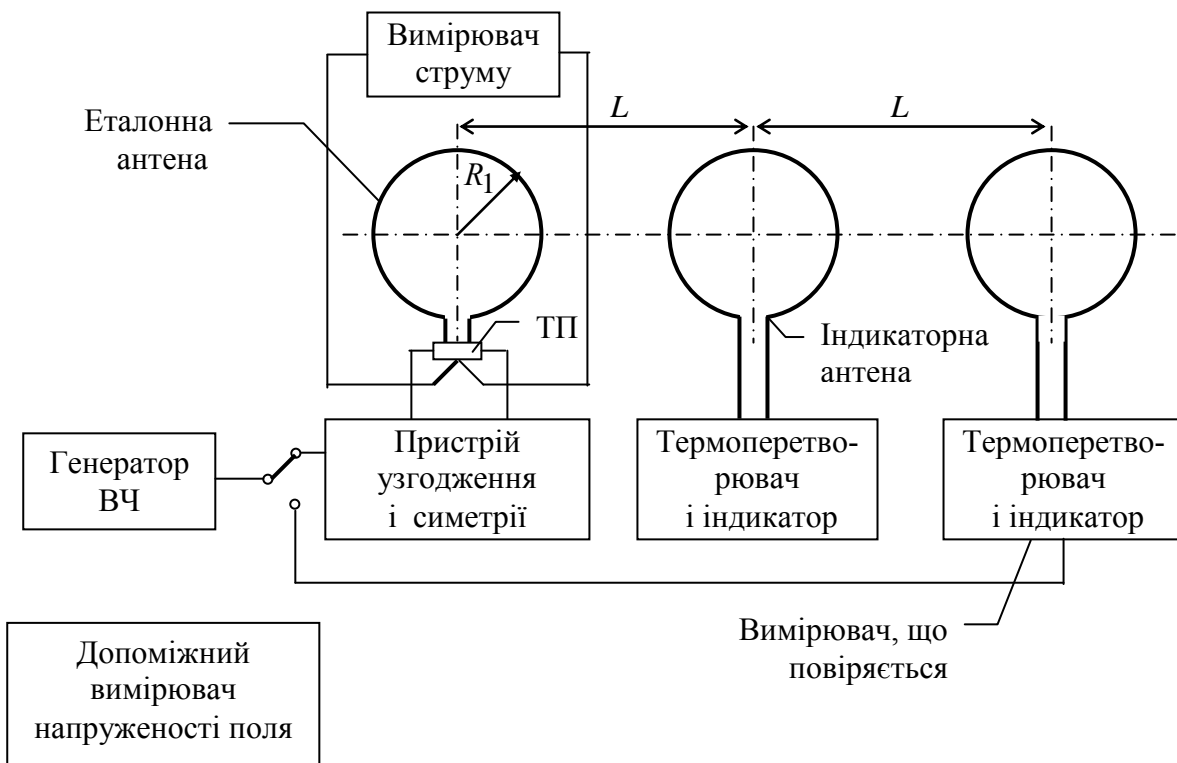


Рис. 6.16. Структурна схема еталона напруженості магнітного поля

При відтворенні одиниці встановлюється рівень вихідної напруги генератора ВЧ, що відповідає номінальному струму термоперетворювача (ТП) ета-

лонної антени. За допомогою потенціометричної установки вимірюється сила струму ВЧ в еталонній антені і за формулою (6.6) розраховується H .

При передачі розміру одиниці (повіріці) рееструються покази індикаторної антени, після чого генератор ВЧ перемикається на антену вимірювача, що повіряється. Остання розташовується співвісно з еталонною й індикаторною антенами на відстані L від індикаторної. При рівності показань індикаторного приладу при його почерговому збудженні полем еталонної антени і антени, що повіряється, напруженості магнітних полів обох антен рівні. Різниця показань, очевидно, є похибкою приладу, що повіряється.

Складовими систематичної похибки еталона є:

- похибки вимірювання радіусу R_1 еталонної антени ($\sim 1 \cdot 10^{-3}$) і відстані L ;
- похибки, пов'язані з неоднорідністю поля в робочій зоні ($1 \cdot 10^{-3}$) і нерівномірністю розподілу струму в еталонній антені ($1 \cdot 10^{-3}$);
- відбиття від стін, конструктивних елементів і т.і. ($2 \cdot 10^{-3}$);
- “антенний ефект” еталонної рамкової антени ($\sim 2 \cdot 10^{-3}$);
- похибка вимірювання струму ($2 \cdot 10^{-3}$);
- струми витоку між витками ($2 \cdot 10^{-3}$).

Державний еталон одиниці напруженості магнітного поля в діапазоні 0,01 – 30 МГц Росії (рис. 6.17) має такі характеристики:

діапазон відтворених значень напруженості складає $2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-6}$ А/м;

сумарна НСП оцінюється значенням $\theta_0 \approx 1 \cdot 10^{-2}$;

СКВ складає $S_0 \approx (0,4 - 0,5) \cdot 10^{-2}$.

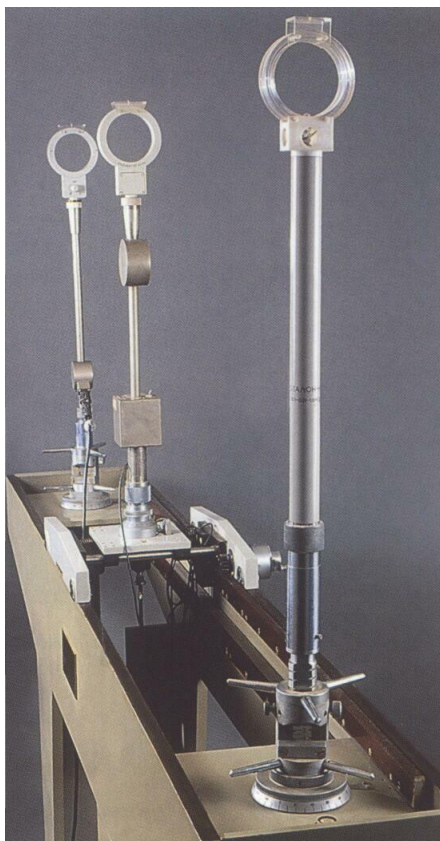


Рис. 6.17. Державний спеціальний еталон одиниці напруженості магнітного поля в діапазоні 0,01 – 30 МГц

При передачі розміру одиниці виникають похибки, пов'язані з неточністю вимірювань струму в антені, що повіряється, неспіввісністю антен і неточністю визначення L , “антенним ефектом” антени, що повіряється. СКВ передачі оцінюється значенням $S_0 \approx (8 - 10) \cdot 10^{-3}$.

6.3 Еталон одиниці спектральної густини потужності шумового радіовипромінювання

Одним із основних параметрів радіоприймальних пристроїв ВЧ і НВЧ, що використовуються в далекому зв'язку, радіолокації і радіонавігації, телебаченні і радіомовленні, є чутливість. Чутливість приймальних пристроїв (і його вузлів – підсилювачів, перетворювачів і т.д.) обмежується, головним чином, рівнем електромагнітних флуктуацій, тобто внутрішніми шумами цих пристроїв. Найбільш просто і достовірно чутливість може бути проконтрольована за допомогою вимірювальних генераторів шуму (ГШ), що служать мірами спектральної густини потужності шумового радіовипромінювання (СГПШ).

СГПШ (G) – це межа відношення потужності шумового радіовипромінювання ΔP у визначеному частотному інтервалі ΔF , до значення цього частотного інтервалу за умови, що інтервал ΔF наближається до нуля. СГПШ чисельно дорівнює потужності шумового радіовипромінювання в частотному інтервалі 1 Гц, її одиницею є Вт/Гц.

Відтворення одиниці СГПШ чи еквівалентної одиниці шумової температури – кельвіна ґрунтується на властивості абсолютно чорного тіла випромінювати електромагнітні хвилі у відповідності до закону Планка:

$$G = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}, \quad (6.7)$$

де T – абсолютна температура, К; f – частота радіовипромінювання, Гц; h – стала Планка, Дж/с; k – стала Больцмана, Дж·К⁻¹.

При $hf \ll kT$ (неквантова область випромінювання) можна вважати $G = kT$. На практиці використовується номінальна надлишкова СГПШ $G_{и}$, тобто різниця номінальних СГПШ двох тіл, нагрітих до температур T і T_0 , відповідно. Тоді

$$G = k(T - T_0),$$

де $T_0 = 293$ К (нормальна температура, 20 °С).

Генератори шуму різних конструкцій і принципів дії градуують шляхом порівняння їх СГПШ із шумами еталонних теплових ГШ за допомогою приймача-радіометра.

В СРСР було створено державний еталон СГПШ, у його склад входять: набір еталонних теплових ГШ, компаратори (приймачі-радіометри), а також пристрої для контролю умов вимірювання і незмінності відтвореного розміру одиниці СГПШ (рис. 6.18, 6.19) [23].

Діапазон частот 0,002 – 178,3 ГГц перекривається дев'ятьма низькотемпе-

ратурними ГШ, що працюють з коаксіальними (до 12 ГГц) і хвильоводними трактами. Кожен еталонний ГШ являє собою одномірну модель абсолютно чорного тіла з термодинамічною температурою поблизу точки кипіння азоту. Основним вузлом низькотемпературних ГШ є занурене в азотний кріостат погоджене навантаження (випромінювач), теплове електромагнітне випромінювання якого виводиться з кріостата через теплоізолюючу лінію передачі до вихідного з'єднувача, що має температуру, близьку до кімнатної.

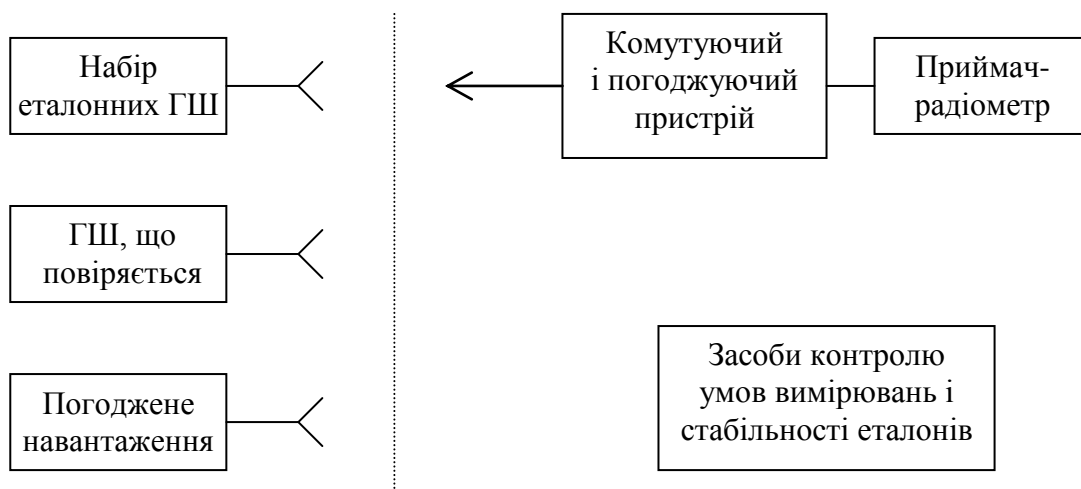


Рис. 6.18. Структурна схема ДЕ СГПШ



Рис. 6.19. Державний первинний еталон одиниці спектральної густини потужності шумового радіовипромінювання

Значення СГПШ ГШ, що повіряється, визначається за допомогою еталонного ГШ шляхом почергового підключення їх до входу компаратора (радіометра). Останній являє собою модуляційний супергетеродинний приймач радіометричного типу, який функціонально і конструктивно розділяється на ВЧ- (НВЧ) тракт і систему індикації. Для того щоб послабити вплив власних шумів радіометра на похибки вимірювання, шуми джерела модулюються (“офарблюються”), підсилюються в приймачі і потім синхронно детектуються. Змінна складова сигналу на виході радіометра характеризує рівень шуму джерела, що досліджується, постійна складова – власні шуми радіометра. Спрощену схему модуляційного радіометра наведено на рис. 6.20.

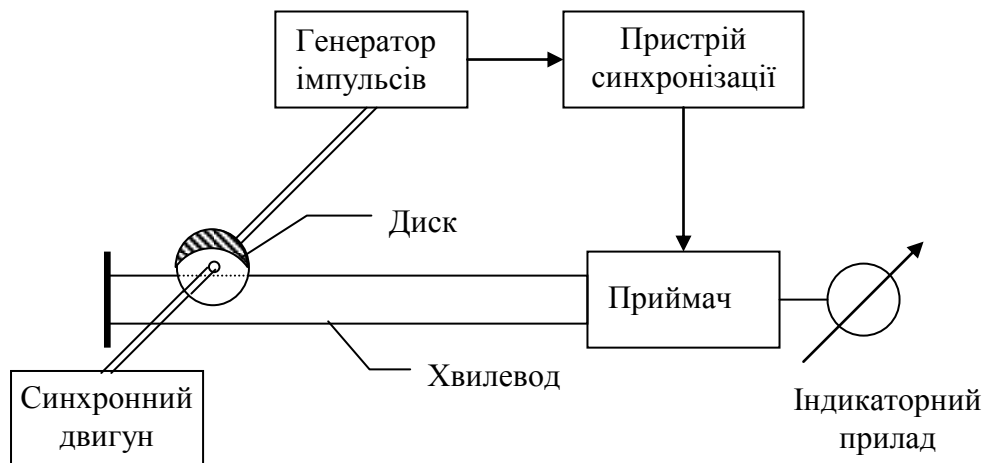


Рис. 6.20. Схема модуляційного радіометра

При обертанні диска, частково покритого поглинаючим матеріалом, у хвильовод періодично вводиться поглинач. Таким чином, відкритий стан входу радіометра чергується з закритим, коли до його входу підключене погоджене навантаження з кімнатною температурою. Генератор імпульсів виробляє сигнали синхронно з обертанням диска і за допомогою пристрою синхронізації керує процесом детектування в приймачі, у результаті чого показання індикатора пропорційні рівню шуму, що надходить на вхід радіометра. Відзначимо, що існує багато різновидів схем модуляційних радіометрів, але всі вони призначені для модуляції вимірюваних шумів.

Центральна задача дослідження еталона СГПШ – метрологічна атестація еталонних ГШ, що включає в себе виконання таких процедур, як вимірювання ослаблення, внесеного лінією передачі, вимірювання температури випромінювача, визначення розподілу температури вздовж лінії передачі, розрахунок еквівалентної шумової температури на виході ГШ, розрахунок СГПШ на виході ГШ і аналіз похибок.

Еталон Росії (рис. 6.19) має такі метрологічні характеристики [23]:

- діапазон частот, ГГц	0,002 – 37,5	37,5 – 178,3
- діапазон вимірювань СГПШ, Вт/Гц (шумової температури, К)	$1,07 \cdot 10^{-21} - 1,1 \cdot 10^{-21}$ (77,4 – 153,5)	$1,17 \cdot 10^{-21} - 2,12 \cdot 10^{-21}$ (85,0 – 153,5)
- СКВ, К	0,1	0,5 – 0,7
- НСП, К	0,2 – 0,4	0,6 – 1,0.

6.4 Висновки

Основним методом відтворення параметрів інтенсивності (напруги, струму, потужності, напруженості поля на змінному струмі) є метод теплового компарування. Тому одним з основних напрямків подальшого вдосконалення еталонів інтенсивності слід вважати розвиток техніки і технології даного методу (термоперетворювачів, калориметрів і їхніх елементів). Іншим перспективним напрямком представляється створення комплексних еталонів потужності, напруги, струму, повного опору і затухання в діапазоні ВЧ і НВЧ, що дозволяє реалізувати в єдиній апаратурі найкращі технологічні і конструкторські рішення в суміжних підвидах і мінімізувати частотні похибки, похибки неузгодженості, нестабільності і т.д.

Якщо говорити про конкретні еталони, зокрема про еталон потужності в промисловому і низькочастотному діапазоні частот, то тут дуже перспективним є використання цифрової і обчислювальної техніки для реалізації перемножування миттєвих значень напруги і струму і одержання значення потужності. Цей метод уже використовується у ряді країн і в перспективі дає можливість визначення програмно-обчислювальним шляхом ряду інших параметрів, зокрема, параметрів якості електричної енергії. Точне вимірювання параметрів якості і забезпечення простежуваності цих вимірювань до еталонів – один з актуальних напрямків вимірювань в електроенергетиці.

Контрольні питання

1. Які параметри інтенсивності, крім напруги і сили струму, ви знаєте?
2. Який метод лежить в основі еталонів потужності від низьких до надвисоких частот?
3. Що таке “відтворення вата у формі фіктивної електричної потужності”? Чому змушені використовувати “фіктивну потужність” при створенні еталона?
4. Що характеризує коефіцієнт ефективності в еталонах потужності на НВЧ?
5. Який процес описується вектором Умова-Пойнтінга? Наведіть формулу.
6. В яких одиницях вимірюється напруженість електричного поля? магнітного поля?
7. Що таке метод “еталонного поля” і метод “еталонної антени”?
8. Яку властивість радіоелектронної апаратури характеризують “спектральною густиною потужності шуму”?

7 ЕТАЛОНИ ОДИНИЦЬ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ І ТРАКТІВ

Електричні та радіотехнічні кола поділяються на дві великі групи: кола з зосередженими постійними (діапазон низьких, середніх та високих частот) та кола з розподіленими постійними (діапазон надвисоких частот). Орієнтовна границя між ними становить 1000 МГц.

До параметрів кіл із зосередженими постійними відносяться опір, індуктивність, ємність і їхні комбінації, а реалізуючими їх пристроями є відповідно резистори, котушки індуктивності та конденсатори. При аналізі цих кіл і вимірюванні їхніх параметрів “працює” апарат основ електротехніки.

На зорі свого розвитку (30-ті і 40-ві рр. минулого століття) техніка НВЧ також використовувала апарат кіл із зосередженими постійними. Однак вже в 40-ві і 50-ті рр. було усвідомлено, що цей апарат має обмежені перспективи для опису процесів у трактах НВЧ, що необхідно вводити параметри, які характеризують саме хвильові процеси та їхні властивості. У цей час були введені в теорію і практику НВЧ такі поняття, як хвильовий опір і коефіцієнти розсіювання. Якщо опір, ємність і індуктивність є мірами енергії, розсіяної на тепло, запасеної електричної і магнітної енергії, то коефіцієнти розсіювання характеризують процеси передачі і відбиття (розсіювання) електромагнітних хвиль. Такий опис виявився універсальним і знайшов широке використання.

Почнемо розгляд з еталонів параметрів кіл із зосередженими постійними. Оскільки еталон одиниці опору вже описано вище, розглянемо еталон одиниці електричної ємності.

7.1 Еталон одиниці електричної ємності

Як вже було сказано вище, саме для ємності вдалося знайти конфігурацію, яку можна було достатньо точно розрахувати. Вона одержала назву “розрахункового конденсатора”.

В основі розрахункового конденсатора лежить теорема електростатики (теорема Томпсона – Лампарда*) [26], яку можна сформулювати в такий спосіб: якщо поперечний переріз деякої довільної циліндричної оболонки, що має принаймні одну вісь симетрії, розділено на чотири частини двома взаємно перпендикулярними прямими, що лежать у площинах, лінія яких паралельна утворюючим циліндричної оболонки, то ємності на одиницю довжини (питомі ємності) між протилежними сторонами будуть рівні.

Розглянемо деякий циліндр, що має площину симетрії ($I-I'$), розділений уздовж твірних на чотири частини. Його поперечний переріз наведений на рис. 7.1. Тоді питомі ємності $\bar{C}_1 = \bar{C}_2 = \bar{C}$.

Точний розрахунок ємності такого конденсатора супроводжується деякими труднощами, які долаються шляхом подання досить складного об'єкта сукупністю простих моделей (системи прямих і коаксіальних циліндрів, тороїдів, кі-

* Tompson-Lampard

лець із круглими чи квадратними перетинами, нескінченні площини і напівплощини).

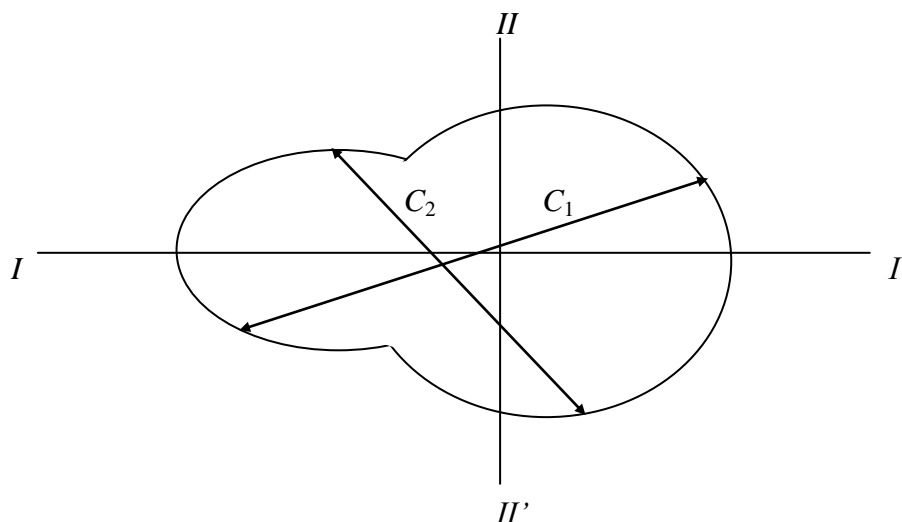


Рис. 7.1. Поперечний переріз циліндричної оболонки конденсатора

Докладно основи методики відтворення ємності за допомогою розрахункового конденсатора викладено в [41], де показано, що повна “перехресна” ємність ідеального розрахункового конденсатора з довжиною циліндра (електродів) l дорівнює

$$C = \bar{C}l = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l, \quad (7.1)$$

а її приріст

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l. \quad (7.2)$$

Із цих формул видно, що середнє значення питомої ємності \bar{C} такого конденсатора є постійним. Відхилення від симетрії приводить до поправочних членів другого порядку малості, настільки ж мало впливають на \bar{C} параметри температурного поля. Важливою позитивною властивістю розрахункового конденсатора (конденсатора Томпсона – Лампада) 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. 7.2), – конденсатор В. Клотье*. Електрична та еквівалентна схеми цього конденсатора наведені на рис. 7.3 (а, б).

* Clothier V. – розробник конденсатора

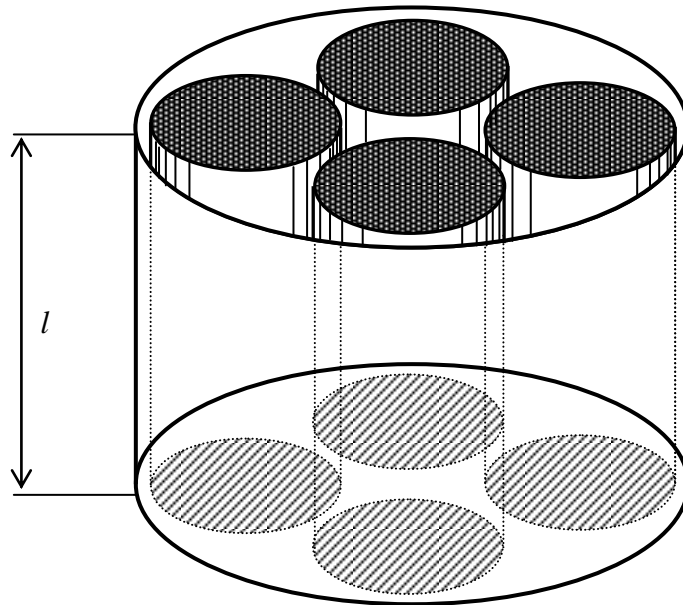


Рис. 7.2. Конструкція розрахункового конденсатора Клотье

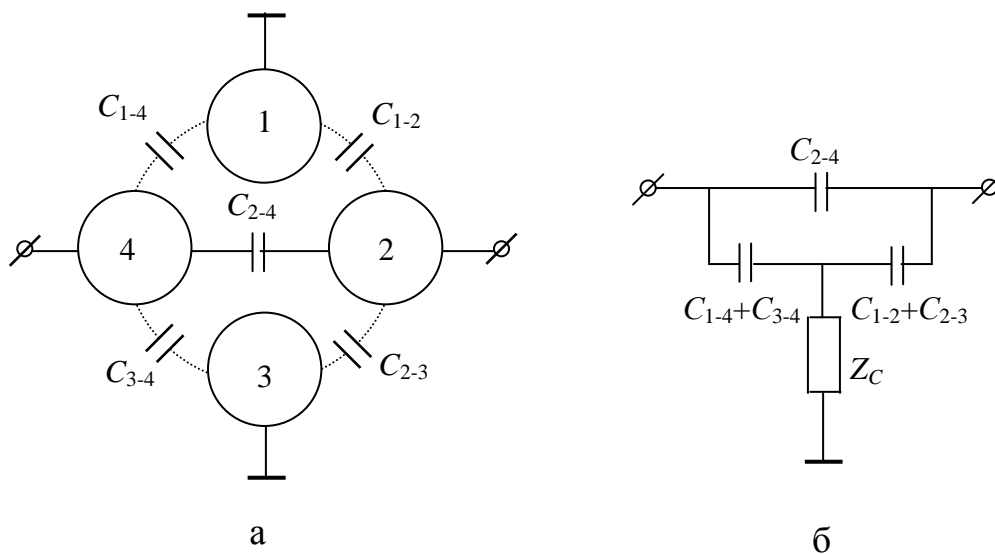


Рис. 7.3. Електрична (а) та еквівалентна (б) схеми розрахункового конденсатора

Вимірювання довжини електродів l здійснюється за допомогою спеціальної інтерферометричної апаратури (застосовуються інтерферометри типу Фабрі – Перо), що встановлюється разом з розрахунковим конденсатором в одному вакуумному блоці.

Джерелом домінуючої похибки розрахунку еталонної ємності є наявність крайових ефектів, що приводять до утворення ємностей між торцевими поверхнями кожної пари циліндрів $C_{кр}$ (рис. 7.4, а). З урахуванням крайового ефекту

$$C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l_0 + C_{кр} .$$

Для підвищення точності розрахунку необхідно виключити вплив цих єм-

ностей. Із цією метою визначають не саму середню ємність C , а її приріст ΔC (рис. 7.4 а). Для цього в простір між електродами вводиться заземлений екран циліндричної форми (рис. 7.4).

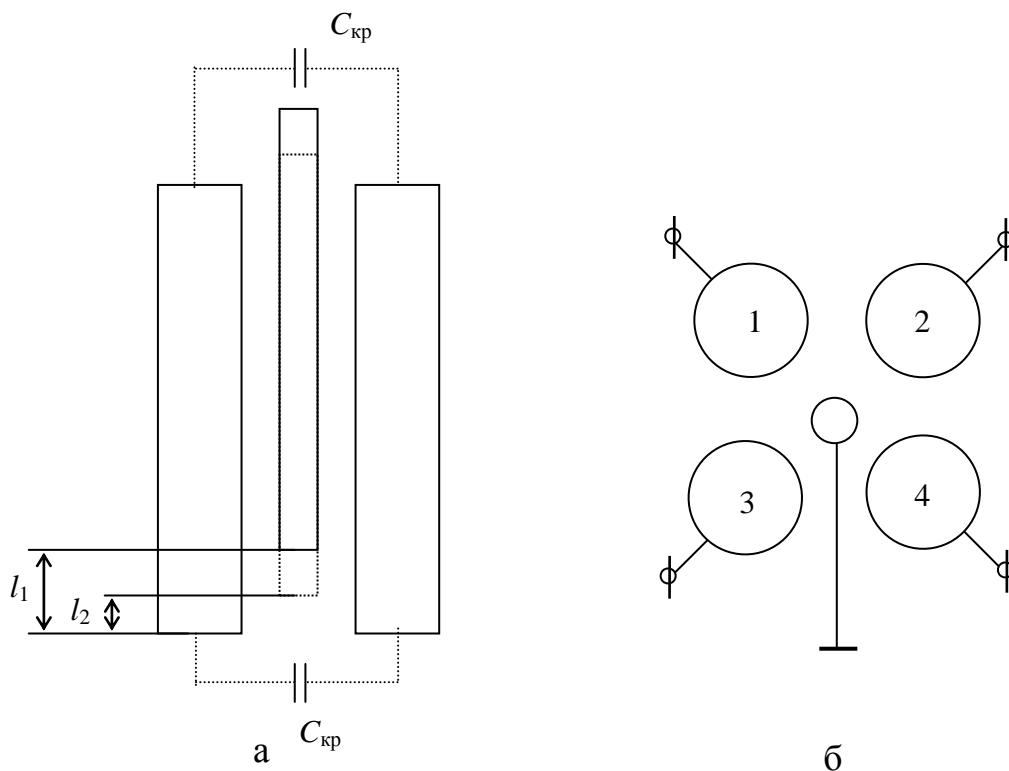


Рис. 7.4. Схема розрахункового конденсатора з заземленим екраном

При просуванні такого екрана уздовж осі крайові ефекти залишаються незмінними, що дозволяє обчислити різницю ємностей у залежності від відстані $\Delta l = l_1 - l_2$, на яку переміщується екран. Тоді

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} l_1 + C_{кр} - \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} l_2 - C_{кр} = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l, \quad (7.3)$$

де Δl – зміна ефективної довжини електродів.

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

Такі циліндричні конструкції дозволяють досягти малої похибки відтворення ємності (на рівні 10^{-6} і нижче) [42]. Недоліком таких конструкцій є те, що ємність їх мала, про що говорилося вище. Існують інші конфігурації електродів, що забезпечують і більші значення ємностей (10–100 пФ), але вони мають і більші похибки відтворення.

До складу первинного еталона електричної ємності, окрім розрахункового конденсатора з інтерферометром, входить апаратура зберігання одиниці ємності для ряду значень, а також засоби передачі розміру одиниці апаратурі зберігання і підпорядкованим еталонам (вторинним і робочим). Структурну схему первинного еталона ємності наведено на рис. 7.5.

До апаратури зберігання відносяться кілька груп високостабільних конденсаторів. В еталонах найбільшого поширення одержали конденсатори з кварцовим діелектриком, які розміщуються в спеціальних термостатах.

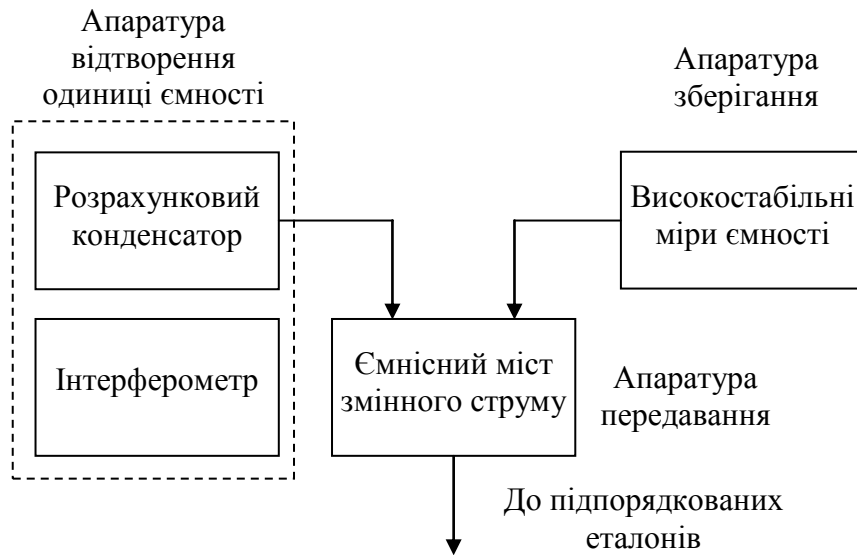


Рис. 7.5. Структурна схема первинного еталона ємності

Передача розміру одиниці від розрахункового конденсатора до конденсаторів підпорядкованих еталонів являє собою самостійну задачу і здійснюється за допомогою спеціальних метрологічних установок на базі мостів змінного струму. Спрощену схему моста змінного струму наведено на рис. 7.6.

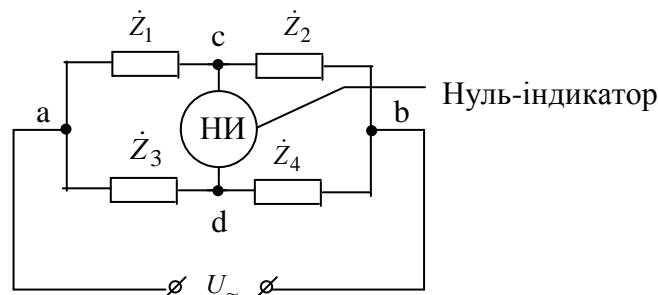


Рис. 7.6. Схема моста змінного струму

Відомі умови рівноваги моста в комплексній формі мають вигляд $\dot{Z}_1\dot{Z}_4 = \dot{Z}_2\dot{Z}_3$, або

$$Z_1Z_4 = Z_2Z_3;$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Із цього випливає, що для зрівноважування моста змінного струму необхідно регулювати не менше двох параметрів схеми.

У метрологічній практиці найчастіше для прецизійних вимірювань ємності застосовують мости з індуктивно-пов'язаними елементами пліч або так звані трансформаторні мости*.

Спрощену схему ємнісного трансформаторного моста наведено на рис. 7.7.

* Особливість трансформаторних мостів полягає в тому, що плечі відношень в них складають котушки з тісним індуктивним зв'язком, які розташовуються на одному осерді з матеріалу з великою магнітною проникливістю, що забезпечує малий вплив електричних і магнітних завад.

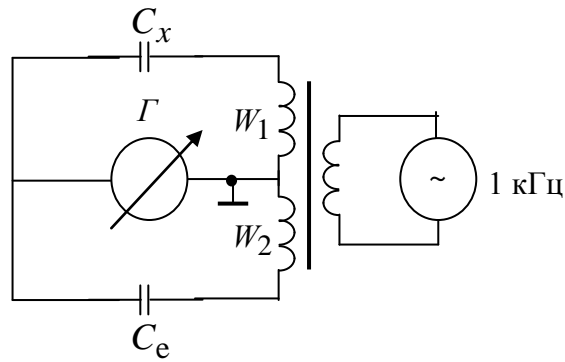


Рис. 7.7. Ємнісний трансформаторний міст

Для такого моста

$$\frac{Z_x}{Z_3} = \frac{W_1}{W_2}; \quad \frac{1}{\frac{\omega C_x}{1}} = \frac{W_1}{W_2}; \quad C_x = \frac{C_e}{W_1} W_2.$$

Практичні схеми таких мостів і процедура передачі розміру одиниці значно складніше. Наведемо короткий опис метрологічного моста, створеного у ВНИИМ (рис. 7.8).

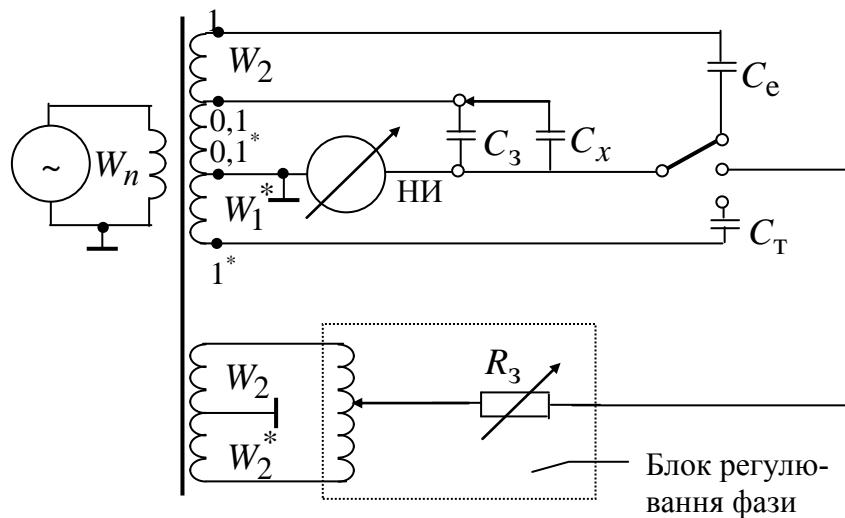


Рис. 7.8. Схема метрологічного моста ВНИИМ

Для точного вимірювання ємності застосовується метод різночасового звірення еталонної C_e і досліджуваної C_x мір. Конденсатори C_e і C_x по черзі включаються в одне з плечей порівняння, при цьому в суміжне плече включається так званий “тарний” конденсатор з ємністю $C_T = C_e$, яка залишається незмінною при двох почергових зрівноважуваннях моста. Рівновага моста досягається регулюванням змінних конденсатора C_3 й резистора R_3 .

У результаті спільного рішення двох рівнянь отриманих при рівновазі моста, одержано вираз для визначення C_x :

$$C_x = kC_0 + \Delta C_3 + V_c, \quad (7.4)$$

де k – коефіцієнт ділення індуктивного подільника, $k \geq 1$ (похибка атестації подільника $10^{-7} - 10^{-8}$); ΔC_3 - різниця відліків по C_3 при двох зрівноваженнях моста; V_c - поправочний член, що залежить від ряду параметрів моста.

Установка застосовується для передачі розміру фаради вторинному і робочому еталонам з номінальними значеннями від 10^{-2} до 10^4 пФ при частоті 1000 Гц. Похибка передачі $S_{\Sigma\epsilon}$ становить $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ у залежності від значення ємності.

Відзначимо, що еталон на розрахунковому конденсаторі являє собою дуже складну конструкцію, виготовити яку на необхідному технологічному і метрологічному рівні – досить складна і дорога задача. Тому лише деякі держави мають такі еталони. Найважливішою позитивною якістю такого еталона є можливість відтворення одиниці ємності в абсолютній мірі – через основну одиницю SI – метр. Типові метрологічні характеристики еталона на розрахунковому конденсаторі такі:

номінальне значення ємності, пФ	від 0,2 до 0,6;
НСП (θ_0)	$(5-10) \cdot 10^{-7}$;
СКВ (S_0)	$(2-5) \cdot 10^{-7}$.

Існує альтернативний шлях відтворення розміру одиниці ємності – через еталони активного опору і частоту з використанням співвідношення $R_{\omega} = F(\omega, C)$, що реалізується за допомогою різних модифікацій квадратурних мостів змінного струму.

Саме цей шлях здійснений у державному еталоні одиниці ємності в Україні [43]. Спрощену структуру еталона наведено на рис. 7.9.

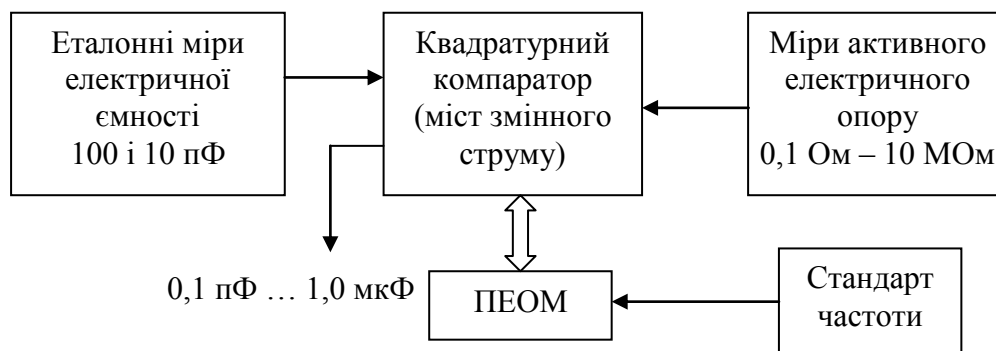


Рис. 7.9. Структурна схема еталона одиниці електричної ємності України

Еталон електричної ємності України має такі характеристики:

діапазон значень ємності, в який передається розмір одиниці, 0,1 пФ – 1,0 мкФ;

НСП відтворення одиниці ємності $\theta_0 \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$;

СКВ відтворення одиниці ємності $S_0 \approx 1 \cdot 10^{-6}$;

нестабільність еталона за рік $v_0 \approx (2-5) \cdot 10^{-7}$.

Як бачимо, цей метод відтворення ємності поступається за точністю методу з використанням розрахункового конденсатора, однак істотно простіше в реалізації.

На закінчення відзначимо, що можливість відтворення фаради двома мето-

дами – за допомогою розрахункового конденсатора, тобто в системі SI (Φ_{SI}), і через холівський опір і частоту ($\Phi_{Холл}$) дозволяє провести їхнє порівняння й узгодження, а також відкриває перспективу подальших метрологічних досліджень у цій галузі (див. рис. 7.10).

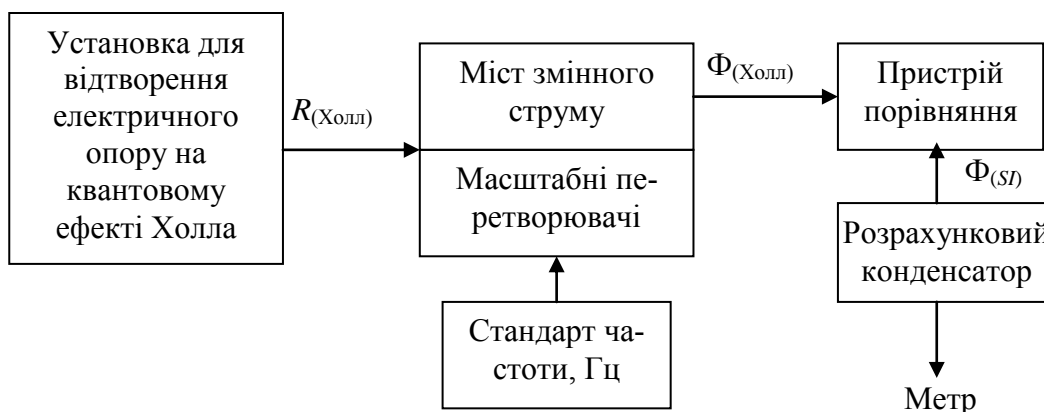


Рис. 7.10. Два способи відтворення одиниці електричної ємності

Як вторинні і робочі еталони одиниці електричної ємності застосовуються однозначні й багатозначні міри ємності. У Росії (ВНИИМ) створено багатозначні міри ємності ММЕ і РД-1 (рис. 5.11).

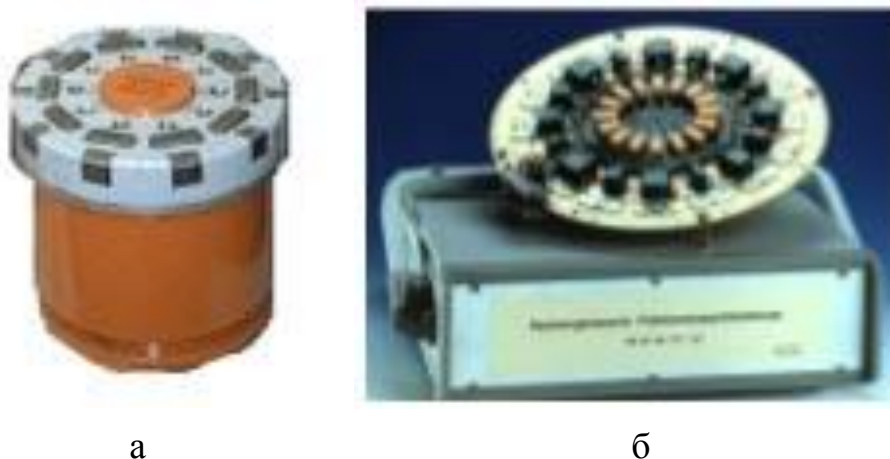


Рис. 7.11. Багатозначні міри електричної ємності ММЕ (а) і РД-1 (б)

Широкодіапазонна багатозначна міра ємності ММЕ містить малогабаритні герметизовані конденсатори, що мають ємність, кратну 10^n пФ ($n = 1...7$), а також ємність 4 нФ. Міра має такі метрологічні характеристики:

ємність, пФ	$10^{-1}; 1; \dots 10^7;$
частота, кГц	0,05 – 100;
похибка (СКВ)	$(1-5) \cdot 10^{-5};$
температурний коефіцієнт ємності, K^{-1}	$5 \cdot 10^{-6}.$

Ультрапрецизійна комп'ютерно-керована міра РД-1 відтворює 11110 значень ємності ступенями через 100 пФ у діапазоні 100 пФ – 1,111 мкФ. Її оригінальна конструкція забезпечує внутрішню збіжність результатів порядку 0,0001 % при самокалібруванні.

7.2 Еталон одиниці індуктивності

Приблизно до середини 70-х років минулого століття відтворення одиниці індуктивності – генрі здійснювалося в абсолютній мірі за допомогою еталона, що базується на розрахункових котушках індуктивності (через геометричні розміри котушок і магнітну проникність середовища). У той же час з початку 70-х рр. успішно розвивалися роботи зі створення еталона ємності на основі розглянутого вище розрахункового конденсатора Томпсона - Лампарда, точність відтворення якої була істотно вище, ніж індуктивності. Тому сьогодні еталон індуктивності одержує значення розміру одиниці від еталона ємності, при цьому передача розміру одиниці здійснюється за допомогою індуктивно-ємнісного моста. Ця ситуація характерна для більшості еталонів розвинутих країн, відмінність існує лише в деяких технічних деталях.

Зокрема, державний еталон одиниці індуктивності Росії являє собою комплекс із чотирьох мір індуктивності – тороїдальних котушок і еталонного індуктивно-ємнісного моста [37]. Розмір відтвореної еталонною одиниці визначається як середнє арифметичне групи

$$L = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 L_i ,$$

де L_i – дійсне значення індуктивності i -ї міри, визначене за допомогою еталонної міри ємності C_e , міри частоти й індуктивно-ємнісного моста.

Спрощену схему моста наведено на рис. 7.12 (відомий як міст Максвелла – Віна).

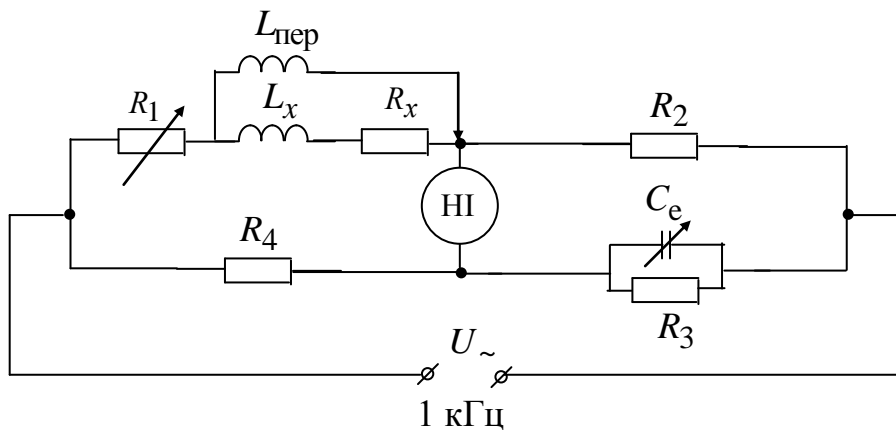


Рис. 7.12. Схема моста Максвелла-Віна

Для точного вимірювання індуктивності застосовується метод двох зрівноважень моста [37]:

а) при включенні послідовно зі змінним опором R_1 індуктивності L_x , що калібрується, при цьому схема врівноважується регулюванням R_1 і C_e ;

б) при включенні перемички $L_{пер}$ на виводи L_x рівновага моста відновлюється регулюванням тих же елементів (R_1 , C_e).

Формула для визначення L_x має вигляд

$$L_x = R_2 R_4 (C_e - C_{3кз})(1 + V_L) + L_{пер} ,$$

де V_L – поправочний член, що залежить від параметрів моста; $L_{пер}$ – індуктивність перемички (виконується мінімальною, оцінюється за геометричними розмірами).

В еталоні Росії номінальне значення відтвореної індуктивності становить $10 \cdot 10^{-3}$ Гн. Оцінка НСП складає $5 \cdot 10^{-6}$, СКВ $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ [44].

Передача розміру одиниці мірам індуктивності, вторинним і робочим еталонам проводиться за допомогою індуктивно-ємнісного моста на $f = 1000$ Гц.

В еталоні України також використовуються принципи відтворення одиниці електричної індуктивності на основі мір ємності, опору і частоти. Як відомо, імпеданси конденсатора з ємністю C_e і котушки з індуктивністю L_e на частоті ω описуються виразами

$$\dot{Z}_C = \frac{1}{j\omega C_e}, \quad \dot{Z}_L = j\omega L_e.$$

Якщо за допомогою згаданого вище квадратурного моста-компаратора встановити рівність $|\dot{Z}_L| = |\dot{Z}_C|$, то можна записати

$$L_e = -\frac{1}{\omega^2 C_e}.$$

Аналогічно можна відтворити одиницю індуктивності через значення електричного опору і частоти:

$$L_e = \frac{R_e}{\omega}.$$

Структурну схему еталона електричної індуктивності України, в якому реалізовано цей метод, наведено на рис. 7.14.



Рис. 7.14. Структурна схема еталона індуктивності України

Еталон України має такі метрологічні характеристики:

відтворювані значення індуктивності $1 \text{ мГн}; 10 \text{ мГн}; 100 \text{ мГн};$
 діапазон, в який передається значення одиниці, $1 \cdot 10^{-6} - 10 \text{ Гн};$

НСП відтворення одиниці
СКВ відтворення одиниці

$3 \cdot 10^{-5}$;
 $1 \cdot 10^{-5}$.

7.3 Еталон одиниці кута фазового зсуву між двома напругами

Одним із параметрів електричних кіл і трактів є вносимий ними фазовий зсув електричного сигналу. Фазові вимірювання – один із розповсюджених видів електричних вимірювань, для проведення яких використовується великий парк відповідних засобів вимірювальної техніки – фазометрів. Для забезпечення єдності і необхідної точності фазових вимірювань багато країн, у тому числі Росія і Україна, створили первинні еталони фазового зсуву.

Методи і засоби відтворення одиниці фазового зсуву пройшли значну еволюцію. Перші еталони базувалися на використанні фазообертачів і рівняння, що зв'язує фазовий зсув з параметрами фазообертача і частотою коливань ω . Для резистивно-ємнісних фазообертачів з параметрами R_1, R_2, C_1, C_2 це рівняння має вигляд

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega R_1 (R_1 C_2 - R_2 C_1)}{R_1 + R_2 + \omega^2 R_1 R_2 (C_1 + C_2)}. \quad (7.6)$$

Резистивно-ємнісний фазообертач дозволяє точно відтворювати невеликі значення кута фазового зсуву (близько 10°), а для розширення діапазону до 360° використовується лінія затримки (ЛЗ), складена із узгоджених між собою проградуированих реактивних ланок. Кут зсуву, відтворений ЛЗ, атестується при значеннях 180° і 360° незалежними методами (наприклад, за допомогою трансформатора в режимі холостого ходу і протифазно включеними обмотками, або з використанням властивостей багатократних фігур Ліссажу).

В еталонах різних країн останніх поколінь для точного вимірювання фази в основному використовують перетворювачі типу «фазовий зсув – інтервал часу – цифровий код», тобто використовують техніку частотно-часових вимірювань. Цей підхід ілюструється на рис. 7.14, де відображені два сигнали, що мають однакову частоту, але зсунуті за фазою.

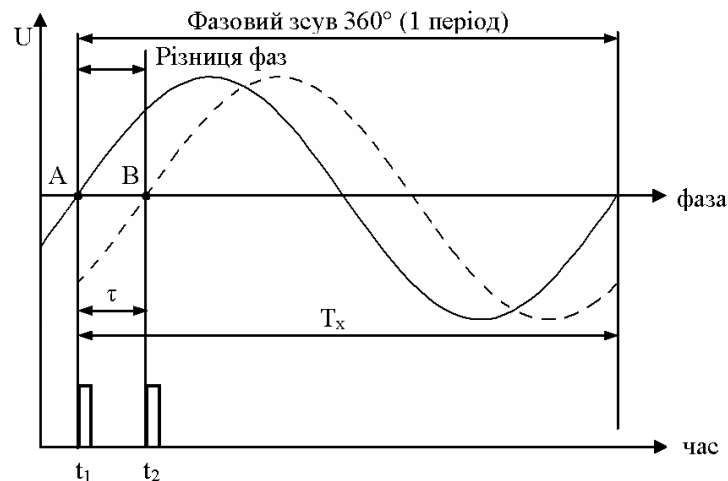


Рис. 7.14. Приклад вимірювання різниці фаз

Вимірюючи інтервал часу між точками А і В, можна розрахувати зсув фаз між ними:

$$\Delta\varphi_{AB} = \frac{360^\circ}{T_x} \tau = 360^\circ f_x \tau, \quad (7.7)$$

де $f_x = \frac{1}{T_x}$.

Для одержання результату у градусах необхідно, щоб частота опорного генератора, що використовується для заповнення вимірюваного інтервалу часу τ , відрізнялася від частоти вимірюваного сигналу в $360 \cdot 10^k$ разів, де k – ціле число. Тоді показ частотоміра N буде пов'язаний з вимірюваним фазовим зсувом рівнянням

$$N = f_0 \Delta\varphi_{AB} / f_x \cdot 360^\circ.$$

Якщо $f_0 / f_x = 360 \cdot 10^k$, то $N = 10^k \Delta\varphi_{AB}$. Наприклад, при $f_x = 1$ кГц і $f_0 = 3600$ кГц $N = 10 \Delta\varphi_{AB}$, тобто кожна одиниця відліку буде відповідати $0,1^\circ$. Похибка вимірювань фазового зсуву визначається за формулою

$$\delta = 360^\circ f_x \Delta\tau = 360^\circ \frac{\Delta\tau}{T_x}.$$

Спрощену типову структурну схему первинного еталона одиниці фазового зсуву наведено на рис. 7.15.

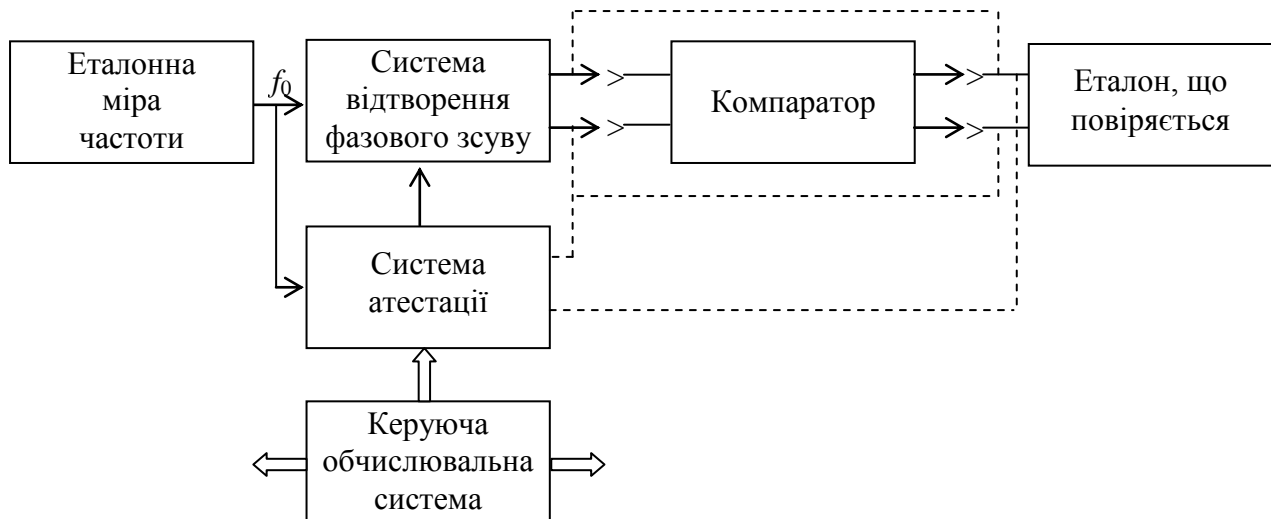


Рис. 7.15. Спрощена структурна схема еталона кута фазового зсуву

Як еталонні міри частоти використовуються опорні високостабільні генератори і синтезатори частоти. У системах відтворення фазового зсуву, як вже було сказано, використовуються еталонні джерела часових інтервалів (в еталоні Росії цю роль виконує прилад И1-8), а також перетворювачі «інтервал часу – фазовий зсув – цифровий код» різних схем і конструкцій. У системах атестації використовуються різні варіанти техніки частотно-часових вимірювань, цифрової обчислювальної техніки, які дозволяють досягти найвищої точності і роздільної здат-

ності. Розмір одиниці кута фазового зсуву передається робочим еталонам (калібраторам фази) за допомогою компаратора (високо стабільного фазометра), а робочим еталонам і ЗВТ пасивного типу (фазометрам різних класів точності) – методом прямих вимірювань.

Первинний еталон Росії [44] відтворює одиницю кута зсуву фаз у діапазоні частот від $1 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^7$ Гц і має метрологічні характеристики, наведені у табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Метрологічні характеристики первинного еталона одиниці фазового кута

f , Гц	Похибки відтворення і передачі (в градусах)		
	НСП відтворення θ	СКВ відтворення S	СКВ передачі S_{Σ}
10^{-2}	0,003	0,003	0,005
10^{-3}	0,001 (до 90°) 0,002 (до 360°)	0,0003 (до $0,5^\circ$) 0,001 (до 360°)	0,001 –
$10^{-5} - 10^{-7}$	0,002	0,002	0,002 – 0,003
$2 \cdot 10^{-7}$	0,002	0,008	0,01

7.4 Поняття про еталони параметрів трактів з розподіленими постійними

В НВЧ-діапазоні застосовують два основних види ліній передавання (трактів) – коаксіальну лінію (рис. 7.16а) і хвилевод (рис. 7.16б). Конструкції, геометричні розміри і форма цих трактів можуть бути різними в залежності від частоти і призначення.

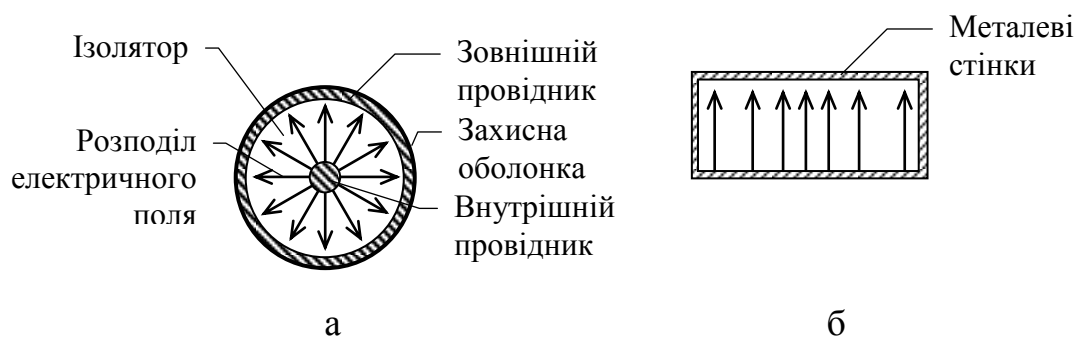


Рис. 7.16. Коаксіальна лінія (а) і хвилевод (б)

Основними параметрами, які нормуються в лініях передавання, є:

- *коефіцієнт стоячої хвилі* за напругою або струмом (КСХН) – відношення максимального і мінімального значення напруги і струму в лінії передавання

$$\frac{U_{x \max}}{U_{x \min}} = \frac{I_{x \max}}{I_{x \min}} = k, \quad (7.9)$$

де x – координата місця вимірювання вздовж лінії; k – позначення КСНХ в

формулах;

- *хвильовий опір лінії передавання* – відношення

$$\frac{U_{x \max}}{I_{x \max}} = \frac{U_{x \min}}{I_{x \min}} = W; \quad (7.10)$$

- *повний опір лінії передавання* Z , який змінюється впродовж лінії від $Z_{\max} = W \cdot k$ до мінімуму $Z_{\min} = \frac{W}{k}$;

- *коефіцієнт відбиття* (КВ) Γ являє собою відношення напруги відбитої хвилі U_B до напруги падаючої хвилі U_{Π}

$$\dot{\Gamma} = \left| \frac{U_B}{U_{\Pi}} \right| e^{j\varphi}, \quad (7.11)$$

де φ – різниця фаз між U_B і U_{Π} .

Коефіцієнт відбиття, виражений через хвильовий опір лінії W і повний опір Z у перетині лінії, що проходить через початок відліку, має вигляд

$$\dot{\Gamma} = \frac{Z - W}{Z + W}. \quad (7.12)$$

Поміж модулем коефіцієнта відбиття і КСНХ існує простий зв'язок:

$$k = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}; \quad \Gamma = \frac{k - 1}{k + 1}.$$

Для забезпечення єдності вимірювань параметрів трактів із розподіленими постійними, враховуючи, що ці параметри пов'язані між собою відомими співвідношеннями, достатньо створити еталон одного параметра на базі пристрою, який може бути реалізований у вигляді простих геометричних форм, що піддаються електродинамічному розрахунку. Таким параметром є коефіцієнт відбиття, а роль первинного еталона КВ для хвильоводів виконує чвертьхвильова ($\lambda/4$) секція короткозамкнутого хвильоводу (рис. 7.17).

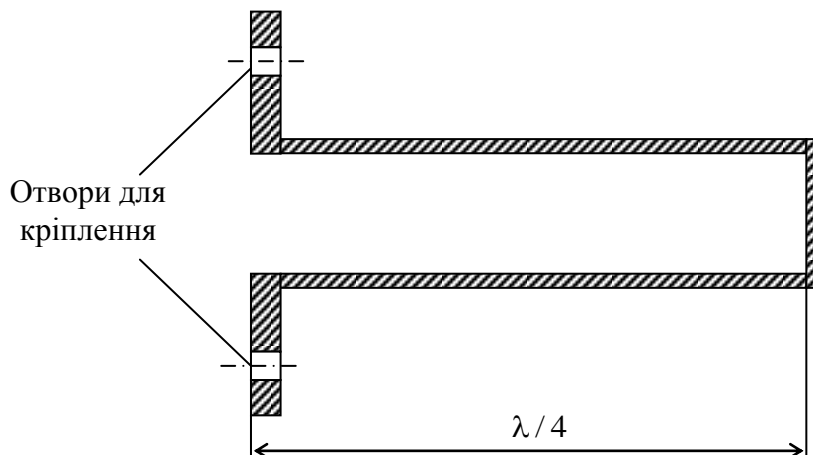


Рис. 7.17. Чвертьхвильова міра КВ ($\Gamma=1$)

Чвертьхвильова довжина лінії забезпечує мінімальний вплив на КВ фланцевого з'єднання, оскільки на відстані $\lambda/4$ від короткого замикання струми в лінії практично відсутні і неідеальність фланцевих з'єднань не проявляється. В ідеальному випадку КВ такого відбивача дорівнює одиниці, реально він становить близько 0,9995 (похибка порядку $2 \cdot 10^{-4}$).

При порівнянні пристроїв, що мають малі значення КВ (0,01 і менше), з еталонним короткозамкнутим відбивачем виникає необхідність вимірювань відношень сигналів 40 дБ і більше, що пов'язано з помітним ростом похибки. Тому необхідно мати еталонні відбивачі з КВ порядку 0,1.

На рис. 7.18 показано кілька конструкцій відбивачів на хвилеводах прямокутного перетину, для яких можна розрахувати КВ менше одиниці.

На рис. 7.18 (а) подано приклад так званої нерегулярності апертурного типу, розрахунок коефіцієнта відбиття якої ведеться на основі теорії Беті за формулою:

$$|\dot{\Gamma}| = \frac{\pi d^3}{6ab\Lambda} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (7.13)$$

де Λ, λ – довжина хвилі у хвилеводі і вільному просторі відповідно.

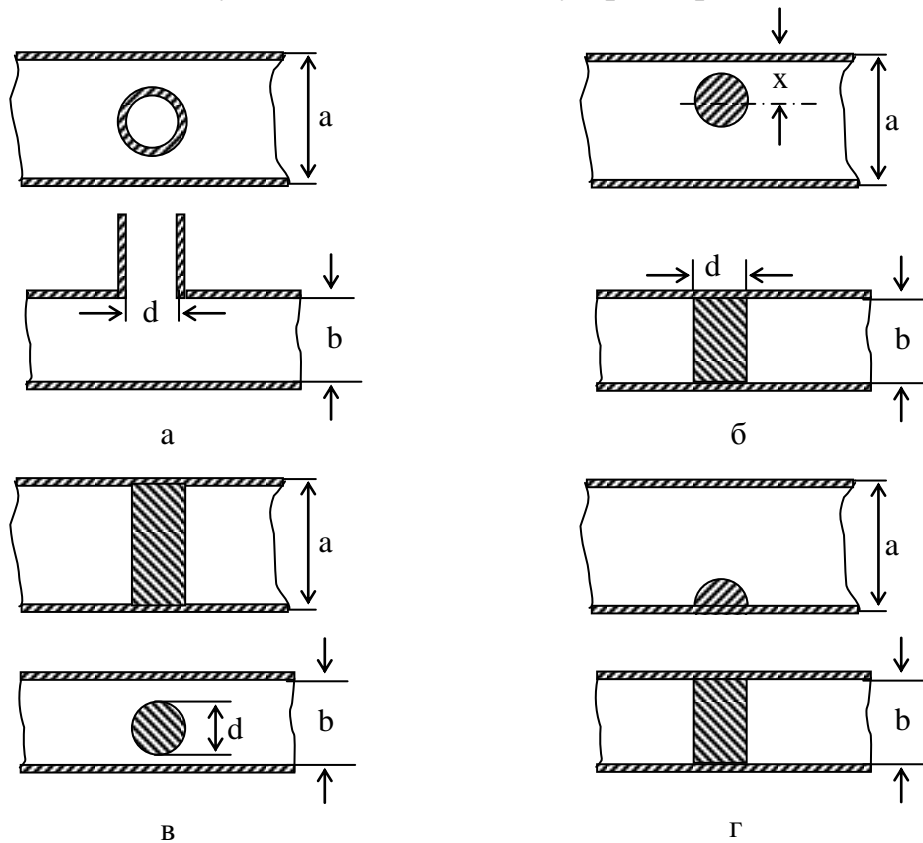


Рис. 7.17. Конструкції відбивачів на хвилеводах прямокутового перерізу

Інші три конструкції на рис. 7.17 являють собою приклади перешкод з циліндричною симетрією, розташованих у хвилеводі, які також піддаються розрахунку. Похибка відтворення таких проміжних мір КВ становить близько 1 %.

У працездатних хвилеводах можна встановити однозначну відповідність між модулем коефіцієнта відбиття і його фазою:

$$\varphi = \pi - \operatorname{arctg} \left(-|\dot{\Gamma}| / \sqrt{1 - |\dot{\Gamma}|^2} \right).$$

Таким чином, еталонні відбивачі на основі реактивних елементів одночасно є мірами фазового зсуву.

До складу еталона входять також міри хвильового опору – відрізки еталонного хвилевода. За наявності надійних мір КВ точність передачі одиниці (градування навантажень) визначається похибкою компаратора, призначення якого – вимірювання відношення КВ навантаження, що повіряється, до КВ еталонного навантаження.

Як компаратор в еталоні Росії застосовується рефлектометрична установка. Вимірювання полягає в порівнянні сигналів, відбитих від еталонної міри КВ і міри, яка повіряється.

Наведемо типові метрологічні характеристики еталона коефіцієнта відбиття в діапазоні 2,54 – 37,5 ГГц:

діапазон вимірювань:

за модулем КВ

0 – 1;

за фазою КВ

0 – 360 град;

номінальні значення КСХН

1,05; 1,2; 1,4; 2,0; 4,5;

похибка відтворення модуля КВ:

НСП

$(2-10) \cdot 10^{-3}$;

СКВ

$(3-5) \cdot 10^{-3}$.

Принцип побудови еталонів для коаксіальних трактів близький (рис. 7.18).



а



б

Рис. 7.18. Первинний еталон хвильового опору в коаксіальних трактах (а) і набори мір для кожного типу коаксіального тракту (б)

До складу еталона входять набори еталонних мір хвильового опору: розрахункові відрізки прецизійних коаксіальних ліній різної довжини; еталонні вимірювачі відношень амплітуд відбитої і падаючої хвиль (вимірювачі КСХН), що використовуються одночасно як компаратори; міри хвильового (вхідного) опору на різні номінальні значення [23]. Очевидно, що похибки еталона залежать від точності виготовлення коаксіальних ліній і вимірювання їхніх геометричних розмірів.

Як вторинні і робочі еталони застосовуються прецизійні міри КВ і хвильового опору, а також вимірювачі відношення амплітуд відбитої і падаючої хвиль (вимірювачі КСХН).

7.5 Висновок

Розгляд існуючих еталонів показує, що основні напрямки вдосконалення еталонів параметрів кіл і трактів лежать у технологічній площині: поліпшення якості і технології виготовлення вузлів і деталей розрахункового конденсатора, еталонних котушок і конденсаторів, мір КВ і хвильового опору. Прогрес у цьому підвиді, очевидно, буде йти в напрямку поступового вдосконалювання названих вище основних елементів, а також інших пристроїв, що беруть участь у процедурі відтворення і передачі одиниць: мостів змінного струму, рефлектометрів і вимірювачів КСХН.

Контрольні питання

1. Що таке розрахунковий конденсатор, яка теорема лежить в його основі?
2. Яка конструкція розрахункового конденсатора вам відома? Через значення якої фізичної величини розраховується ємність?
3. Який метод відтворення одиниці ємності, крім розрахункового, використовується в метрології?
4. Що таке квадратурний міст-компаратор, які фізичні величини він здатний порівнювати?
5. Які методи відтворення електричної індуктивності ви знаєте?
6. Які види вимірювальних перетворень використовуються в еталоні фази, щоб звести вимірювання фази до вимірювання частоти?
7. Поясніть терміни: параметри електричних кіл з “зосередженими і розподіленими постійними”.
8. Які параметри кіл з розподіленими постійними ви знаєте? Поясніть їх фізичну суть.

8 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ І РАДІОТЕХНІЧНИХ СИГНАЛІВ

8.1 Загальні відомості про вимірювання параметрів сигналів

До засобів вимірювання параметрів сигналів загального застосування*, відповідно до класифікації за ГОСТ 15094–86, відносяться:

- генератори вимірювальні (підгрупа Г);
- осцилографи різних видів (підгрупи С1, С7, С8, С9);
- вимірювачі коефіцієнта амплітудної модуляції (С2);
- вимірювачі девіації частоти (С3, СК3);
- аналізатори спектра (С4, СК4);
- вимірювачі нелінійних спотворень (С6).

Крім приладів загального застосування, в даній області радіовимірювань існує значна кількість спеціалізованих приладів для систем зв'язку, наукових досліджень тощо.

Підгрупа Г включає до себе такі прилади:

Г1 – установки для повірки вимірювальних генераторів;

Г2 – генератори шумових сигналів;

Г3 – генератори сигналів низькочастотні (до 200 кГц);

Г4 – генератори сигналів високочастотні;

Г5 – генератори сигналів імпульсні;

Г6 – генератори сигналів спеціальної форми;

Г8 –свіп-генератори.

Усі прилади цієї підгрупи є джерелом стабільних сигналів заданої форми, параметри яких нормуються, тобто можуть змінюватися у визначених межах і встановлюватися з визначеною точністю.

Прилади підгруп С2, С3, СК3 включають до себе

- вимірювачі коефіцієнта амплітудної модуляції (модулометри) в широкому діапазоні несучих і модулюючих частот (С2);
- вимірювачі девіації частоти (девіометри) частотно-модульованих (ЧМ) сигналів в широких діапазонах несучих і модулюючих частот (С3);
- комбіновані вимірювачі параметрів амплітудної, частотної та фазової модуляції (СК3).

Крім основних (корисних) параметрів, позначених у назвах приладів, модулометри і девіометри здатні вимірювати і так звані “паразитні” параметри АМ і ЧМ сигналів: спотворення законів модуляції, супровідну модуляцію (АМ при ЧМ, ЧМ при АМ), амплітудну і кутову модуляцію шумового характеру.

Прилади підгрупи С6 – це вимірювачі нелінійних спотворень електричних сигналів, виражених у формі коефіцієнта гармонік.

Підгрупи С1, С7, С8, С9 включають до себе осцилографи різних видів

* До засобів вимірювань загального застосування відносять електрорадіовимірювальні прилади, що випускаються серійно і відповідають ГОСТ 22261-94 “Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические требования”.

(універсальні, швидкісні, стробоскопічні, запам'ятовуючі, спеціальні), призначені для спостереження і дослідження форми сигналів в координатах «напруга-час».

Підгрупа С4 і СК4 включає до себе аналізатори спектра, за допомогою яких вимірюються розподілення рівня (напруги, потужності) сигналу в функції частоти. Розділяють аналізатори спектра послідовної і одночасної (в реальному масштабі часу) дії.

Не дивлячись на ряд ознак, які поєднують названі підгрупи приладів (багатофункціональність, нормування великої кількості параметрів і характеристик), існують і деякі відмінності.

Так, вимірювачі нелінійних спотворень (коефіцієнта гармонік), коефіцієнта АМ, девіації частоти (підгрупи С6, С2 і С3) призначені для вимірювань конкретного виду сигналу і мають нормовану похибку вимірювання основного параметра цього сигналу. Вимірювачі нелінійних спотворень призначені для вимірювання коефіцієнтів гармонік квазігармонічних сигналів. Вимірювачі коефіцієнта АМ (модулометри) і девіації частоти (девіометри) призначені для вимірювання параметрів амплітудно-модульованих (АМ) і частотно-модульованих (ЧМ) сигналів відповідно.

Інакше обстоїть справа з такими приладами, як осцилографи й аналізатори спектра (АС). Для цих приладів характерні такі особливості:

- можливість дослідження широкого класу сигналів – від простих гармонійних до складних модульованих, маніпульованих тощо;
- багатофункціональність, тобто можливість розв'язання з їхньою допомогою великої кількості вимірювальних задач.

Для цих приладів поняття “похибки осцилографа” чи “похибки аналізатора спектра” є некоректними. У них нормується до 30-40 “внутрішніх” параметрів (нерівномірність АЧХ, нелінійність амплітудної характеристики, шуми, похибки вимірювань рівнів і частот, перехідна характеристика і т.ін.), що дає можливість користувачу самому розрахувати похибку вимірювань того чи іншого параметра в залежності від характеру вимірювальної задачі, досліджуваного об'єкта й умов вимірювань.

Тому підходи до метрологічного забезпечення різних підгруп засобів вимірювань параметрів форми і спектра радіосигналів дещо відрізняються. Якщо для приладів підгруп С2, С3, С6 можна говорити про створення еталонів одиниць вимірюваних величин (коефіцієнта гармонік, коефіцієнта АМ, девіації частоти), то для осцилографів і АС говорити про якісь спеціалізовані еталони недоречно. Підхід до метрологічного забезпечення цих приладів інший і буде розглянутий окремо.

8.2 Забезпечення єдності вимірювань нелінійних спотворень

8.2.1 Загальні відомості про спотворення сигналів. Нелінійні спотворення

Тракти передачі, посилення, формування і обробки електричних сигналів

можуть вносити лінійні, флуктуаційні (шумові) та нелінійні спотворення.

В лінійних системах з постійними параметрами виникають тільки лінійні спотворення (амплітудні, частотні, фазові), обумовлені його амплітудно-частотними і фазочастотними характеристиками. Вихідне коливання містить при цьому тільки ті спектральні складові, які є у вхідному коливанні, хоча форма вхідного й вихідного коливання можуть відрізнятись. Однак співвідношення між амплітудними або іншими значеннями вхідних і вихідних коливань і форма вихідного коливання не залежать від амплітуди вхідного коливання.

Нелінійність системи з постійними параметрами проявляється в тому, що на її виході виникають спектральні складові нових частот, яких немає в спектрі вхідного коливання. Спотворення такого роду є нелінійними. При зміні амплітуди вхідного коливання і постійній його формі форма вихідного коливання змінюється.

Окремо скажемо про шумові завади або спотворення, які виникають як в лінійних, так і нелінійних системах і призводять до амплітудних, частотних та фазових флуктуацій, які накладаються на інформативний сигнал і також вносять спотворення (шумового характеру). Боротьба з шумовими завадами і їх вимірювання – окрема тема, яка в рамках даного посібника не розглядається.

Існує багато параметрів для нормування нелінійних спотворень, які залежать від природи нелінійності, причин її виникнення, методів та засобів її вимірювання. Так, при використанні різних методів вимірюють такі види спотворень (рис. 8.1):

- гармонійні, що виникають при подачі на нелінійний елемент (НЕ) гармонійного коливання;
- комбінаційні – при подачі на НЕ двох - і тричастотного випробувального сигналу;
- модуляційні (перехресні) – при модуляції корисного сигналу сигналом перешкоди;
- SINAD – при вимірюванні суми продуктів нелінійності та шумів;
- перехідні перешкоди – при вимірюванні продуктів переходу з каналу в канал в багатоканальних системах через наявність нелінійності;
- загасання нелінійності – гармонічні спотворення в логарифмічній формі.

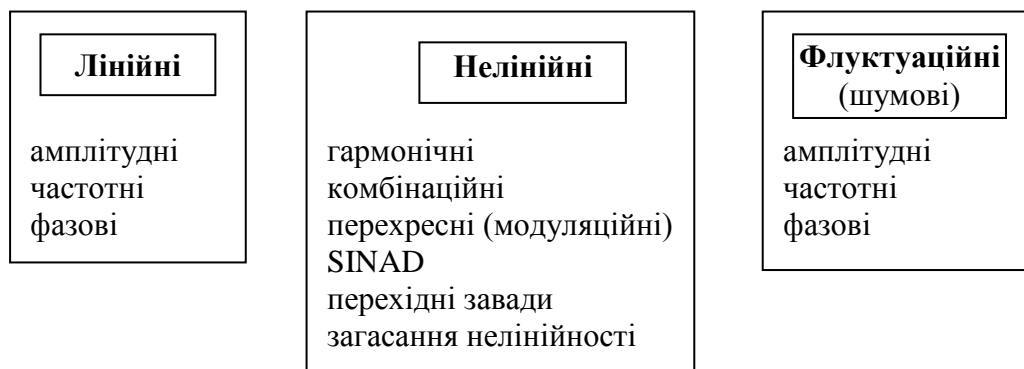


Рис. 8.1. Види спотворень

В окремих спеціалізованих приладах, зокрема зв'язкових, використовують й інші методи і параметри для визначення нелінійності.

Нелінійні елементи, в залежності від їх інерційних властивостей, поділяють на:

- НЕ з резистивною нелінійністю (інерційністю яких в діапазоні робочих частот можна нехтувати);
- НЕ комплексного характеру (частотно-залежні).

Важливою умовою забезпечення єдності вимірювання параметрів нелінійних спотворень є можливість перерахування різних показників нелінійності в єдиний параметр.

Дослідження показали, що найбільш універсальним параметром для оцінки нелінійних спотворень є *коефіцієнт гармонік* (КГ), тобто відношення квадратичної суми вищих гармонік сигналу на виході НЕ до першої при гармонічному вхідному сигналі (рис. 8.2):

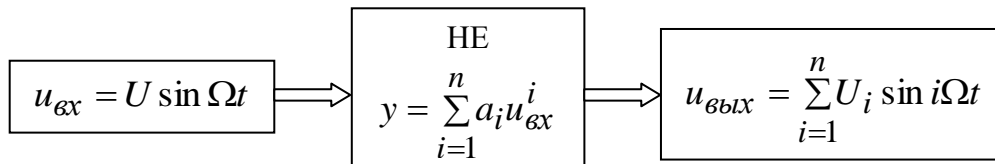


Рис. 8.2. Метод оцінки нелінійності за коефіцієнтом гармонік

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}. \quad (8.1)$$

КГ вихідного сигналу вимірюється відповідним приладом – вимірювачем КГ (підгрупа С6).

Іноді нормують і вимірюють КГ у вигляді відношення СКЗ напруги вищих гармонік і СКЗ повної напруги $U_{\text{КГ}}$:

$$K_{\Gamma}^* = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2}} 100 \% . \quad (8.2)$$

Зв'язок між K_{Γ} і K_{Γ}^* має вигляд

$$K_{\Gamma} = \frac{K_{\Gamma}^*}{\sqrt{1 - (K_{\Gamma}^*)^2}} \quad (8.3)$$

Якщо $K_{\Gamma} < 10\%$, значення K_{Γ} і K_{Γ}^* відрізняються незначно (менш ніж на 1%). Можна показати, що існують формули для перерахування різних

показників нелінійності в КГ і сформульовані вимоги їх тотожності.

Таким чином, необхідними умовами для забезпечення єдності вимірювань нелінійних спотворень є

- вибір єдиного параметра для оцінки нелінійних спотворень – коефіцієнта гармонік;
- можливість перерахування інших параметрів в коефіцієнт гармонік;
- забезпечення простежуваності результату вимірювання КГ до еталона одиниці КГ або іншої фізичної величини, пов'язаної з КГ відомим співвідношенням.

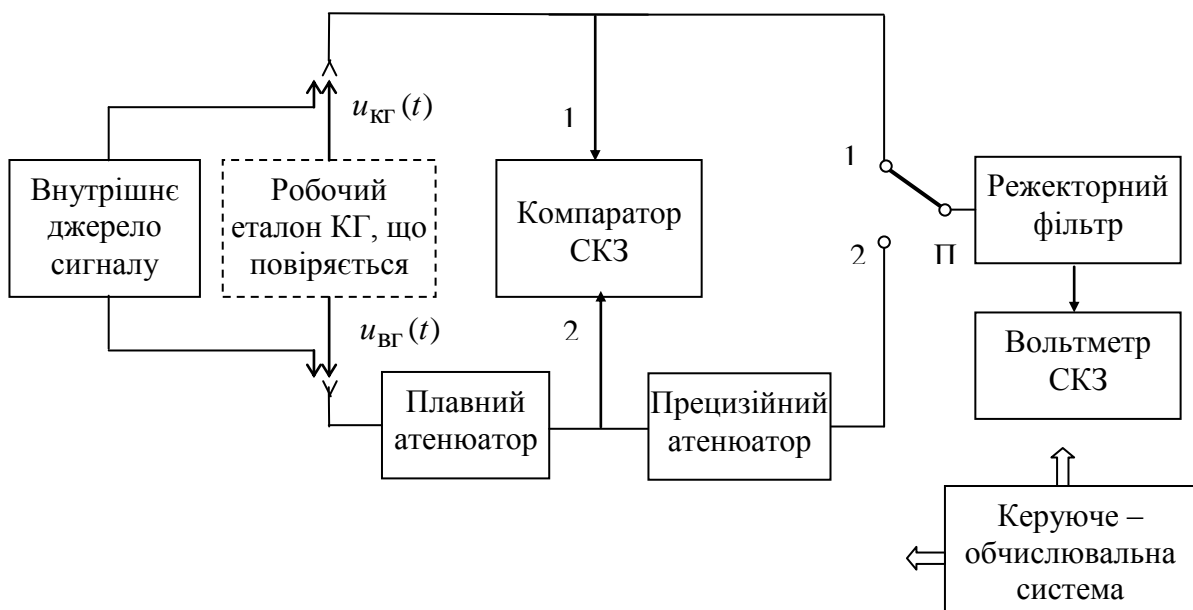
У ряді країн, у тому числі в Україні, були створені первинні еталони одиниці КГ. Розглянемо такий еталон докладніше.

8.2.2 Еталон одиниці коефіцієнта гармонік

Еталон одиниці КГ [28] побудований таким чином, що він може як відтворювати сигнали з каліброваними значеннями КГ (режим повірки вимірювачів КГ), так і здійснювати точне вимірювання КГ зовнішнього сигналу (режим атестації робочих еталонів). Таким чином, еталон КГ поєднує у собі властивості як міри, так і вимірювального приладу.

В основу еталона покладено метод з використанням калібрувального сигналу ($K_{\Gamma}=100\%$). У цьому методі із вихідного спотвореного гармонічного сигналу U_c вилучається перша гармоніка, і середньоквадратичне значення (СКЗ) напруги вищих гармонік $U_{\text{ВГ}} = \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}$ компарується з СКЗ вихідного сигналу $U_c = U_{\text{ВГ}}$, що відповідає $K_{\Gamma}=100\%$.

Структурну схему еталона наведена на рис. 8.3. Розглянемо його роботу в режимі атестації робочого еталона*.



* Робочий еталон є джерелом сигналу з каліброваним КГ.

Рис. 8.3. Структурна схема еталона одиниці коефіцієнта гармонік

Робочі еталони (СК6-10, К2С-57) видають сигнали таких видів:

- спотворений гармонійний, що являє собою коливання з частотою Ω і кількома її гармоніками:

$$u_{\text{КГ}}(t) = \sum_{i=1}^n U_{mi} \sin(i\Omega t + \varphi_i) ;$$

- з подавленою першою гармонікою, тобто такий, що складається з вищих гармонік частоти Ω :

$$u_{\text{ВГ}}(t) = \sum_{i=2}^n U_{mi} \sin(i\Omega t + \varphi_i) .$$

Спектри цих сигналів наведено на рис. 8.4 а, б.

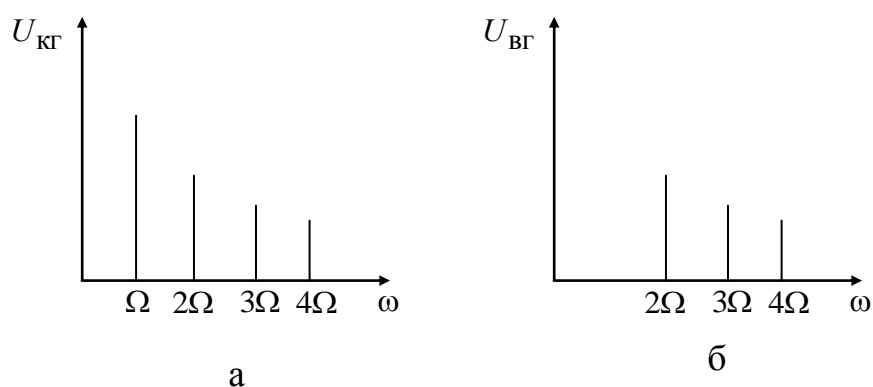


Рис. 8.4. Спектри сигналів $u_{\text{КГ}}(t)$ і $u_{\text{ВГ}}(t)$

Напруга $u_{\text{КГ}}(t)$ подається на перший вхід компаратора, а на другий – через плавний атенюатор надходить напруга $u_{\text{ВГ}}(t)$. Компарування відбувається по чергово, тобто спочатку вимірюється СКЗ напруги $u_{\text{КГ}}(t)$, потім СКЗ $u_{\text{ВГ}}(t)$, яке за допомогою плавного атенюатора встановлюється рівним СКЗ $u_{\text{КГ}}(t)$:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2} = \sqrt{\sum_{i=2}^n A_i^2} , \quad (8.4)$$

де A_i – СКЗ i -ї гармоніки після проходження атенюатора.

Усі операції компарування в еталоні відбуваються автоматично, що з метрологічної точки зору не принципово.

З урахуванням формул (8.2) і (8.4), можна записати

$$A_{\text{ВГ}} = \sqrt{\sum_{i=2}^n A_i^2} = K_{\Gamma}^* \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} .$$

Далі $u_{\text{КГ}}(t)$ подається на режекторний фільтр (П в положенні 1), у якому здійснюється пригнічення першої гармоніки. Напряга на виході режекторного фільтру (позначимо N_1) вимірюється вольтметром СКЗ:

$$N_1 = \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2} .$$

Потім на вхід режекторного фільтра (П в положенні 2) подається $A_{\text{ВГ}}$ через зразковий атенуатор, на виході якого напряга дорівнює

$$\frac{A_{\text{ВГ}}}{K_A} = K_{\Gamma}^* \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \frac{1}{K_A} ,$$

де $\frac{1}{K_A}$ – коефіцієнт передачі атенуатора, який встановлюється рівним номінальному КГ сигналу робочого еталона.

Напряга N_2 на виході режекторного фільтра дорівнює

$$N_2 = K_{\Gamma}^* \sqrt{\sum_{i=2}^n A_i^2} \frac{1}{K_A} . \quad (8.5)$$

Очевидно, що коли $\frac{1}{K_A} = K_{\Gamma}$, то $N_2 = N_1$. На практиці, як правило, цього не буває, тоді відносну похибку робочого еталона знаходимо за формулою

$$\frac{\Delta K_{\Gamma}^*}{K_{\Gamma}^*} = \frac{N_1 - N_2}{N_2} . \quad (8.6)$$

У режимі повірки вимірювача КГ замість робочого еталона включають внутрішнє джерело еталона, що видає аналогічні сигнали ($u_{\text{КГ}}(t)$ і $u_{\text{ВГ}}(t)$). Відповідно до описаної вище процедури здійснюють калібрування K_{Γ} відтвореного сигналу і подають його на вимірювач, що повіряється.

Керування й обробка результатів вимірювань здійснюються за допомогою керуючої обчислювальної системи, що включає до себе ПЕВМ, виконавчі і програмні засоби.

Основними джерелами похибки еталона є неідеальність обробки сигналу (фільтрації, компарування) і неідеальність вимірювального тракту (неточність атенуатора, нерівномірність АЧХ, шуми). Створений в Україні державний еталон одиниці коефіцієнта гармонік (рис. 8.5) має такі метрологічні характеристики:

діапазон частот, кГц	0,01 – 200;
діапазон вимірювання КГ, %	0,001 – 100;
абсолютна НСП	0,0002 – 0,002 %;
відносна НСП ($\tilde{\theta}_0$)	$(2-6) \cdot 10^{-3}$;
відносна СКВ (\tilde{S}_0)	$5 \cdot 10^{-4}$.



Рис. 8.5. Еталон одиниці коефіцієнта гармонік

8.3 Еталон одиниці коефіцієнта амплітудної модуляції

Еталон призначений для атестації робочих еталонів, що відтворюють АМ сигнал з каліброваним коефіцієнтом АМ, і перевірки найбільш точних модулометрів, що є вимірниками (приймачами) АМ сигналів.

8.3.1 Параметри АМ сигналу [28]

АМ сигнал з гармонічним несучим коливанням можна подати виразом

$$u(t) = E(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де $E(t)$ – миттєва амплітуда або *огинаюча* АМ сигналу; ω_0 – несуча частота (частота у відсутності модуляції); φ_0 – початкова фаза.

Обвідна сигналу може бути записана як

$$E(t) = E_0 [1 + m(t)],$$

де E_0 – амплітуда несучого (немодульованого) коливання; $m(t)$ – закон зміни амплітуди при модуляції.

При гармонічній АМ закон зміни амплітуди буде

$$m_{\Omega}(t) = m \cdot \sin \Omega t,$$

де $\Omega = 2\pi F$ – частота модулюючої напруги; m – коефіцієнт АМ.

Зображення модулюючого $u_{\Omega}(t)$ і модульованого $u(t)$ сигналів наведено на рис. 8.6.

Середнє значення амплітуди за період модуляції $T = \frac{1}{F}$

$$E = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} E(t) dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} E_0 [1 + m(t)] dt = E_0 + m_0 E_0 ,$$

$$\text{де } m_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} m(t) dt .$$

Коефіцієнти АМ у бік збільшення і зменшення амплітуди (для позитивної і негативної напівхвиль огинаючої АМ сигналу) прийнято називати коефіцієнтами амплітудної модуляції “вверх” m_B і “вниз” m_H (див. рис. 8.6)

$$m_B = \frac{\Delta E_B}{E} = \frac{E_{\max} - E}{E} ; \quad m_H = \frac{\Delta E_H}{E} = \frac{E - E_{\min}}{E} . \quad (8.7)$$

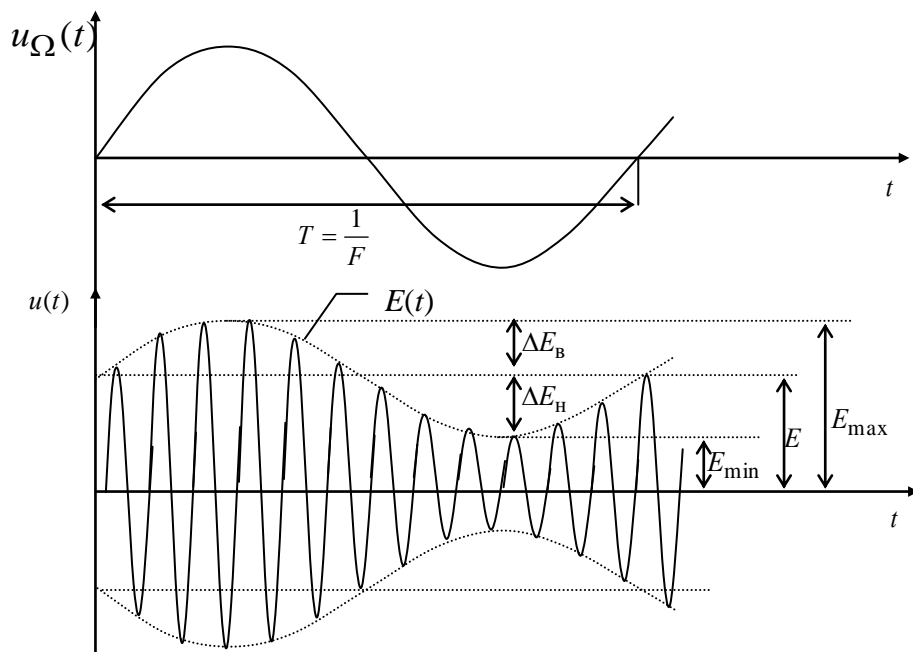


Рис. 8.6. АМ сигнал $u(t)$ та його огинаюча $E(t)$

У ряді випадків, наприклад, при передачі цифрової інформації, використовується середнє значення коефіцієнта АМ:

$$m_c = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} . \quad (8.8)$$

При симетричній модуляції, коли модуляційна характеристика лінійна, усі перелічені значення коефіцієнта АМ збігаються: $m_B = m_H = m_c = m$.

При складному законі АМ використовується середньоквадратичне значення коефіцієнта АМ

$$m_{CK} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} m^2(t) dt} .$$

У випадку наявності нелінійних спотворень закону АМ (огинаючої АМ сигналу) вираз для АМ сигналу має вигляд:

$$u(t) = E_0 \left[1 + \sum_{i=1}^N m_i \sin(i\Omega t + \varphi_i) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

де m_i – парціальні коефіцієнти АМ з частотами $i\Omega$.

$$\text{Тоді } K_{\Gamma 2} = \frac{m_2}{m_1}; \quad K_{\Gamma 3} = \frac{m_3}{m_1}; \quad \dots \quad K_{\Gamma N} = \frac{m_N}{m_1},$$

де $K_{\Gamma i}$ – парціальні коефіцієнти гармонік огинаючої АМ ($i = 1, 2, \dots, N$).

Сумарний КГ дорівнює

$$K_{\Gamma} = \sqrt{K_{\Gamma 2}^2 + K_{\Gamma 3}^2 + \dots + K_{\Gamma N}^2} = \sqrt{\sum_{i=2}^N K_{\Gamma i}^2} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N m_i^2}}{m_1}. \quad (8.9)$$

Крім корисної (змушеної) АМ реальний сигнал завжди має паразитну АМ флуктуаційного (шумового) характеру, яку називають також амплітудним шумом. Він нормується у формі середньоквадратичного коефіцієнта паразитної АМ $m_{\text{ш}}$, що дорівнює

$$m_{\text{ш}} = m_{\text{СК}} = \frac{\sqrt{\int_{F_{\min}}^{F_{\max}} S_u(F) dF}}{U_{\text{СК}}} \cdot 100 \%, \quad (8.10)$$

де $S_u(F)$ – спектральна густина потужності флуктуацій амплітуди, $\text{В}^2/\text{Гц}$; F_{\min} і F_{\max} – граничні значення смуги частот; $U_{\text{СК}}$ – СКЗ напруги несучої.

Коефіцієнт $m_{\text{ш}}$ є абсолютною похибкою вимірювання (відтворення) коефіцієнта корисної АМ.

8.3.2 Апаратурне рішення та характеристики еталона

Аналіз, наведений у [45] дозволяє сформулювати такі принципи побудови еталона коефіцієнта АМ:

а) оптимальною є побудова еталона у вигляді міри одиниці коефіцієнта АМ, тобто джерела вимірювального сигналу з гармонічною АМ і з каліброваним коефіцієнтом АМ;

б) діапазони несучих і модулюючих частот АМ сигналів еталона повинні відповідати частотам апаратури, що повіряється, однак відтворення сигналу цілком достатньо проводити в дискретних значеннях F , m і f ;

в) оскільки такі параметри АМ сигналу, як K_{Γ} і $m_{\text{ш}}$ є джерелами похибки відтворення КАМ, вони повинні бути мінімізовані, а до складу апаратури по-

винні входити засоби атестації АМ сигналу по цих параметрах.

В основу відтворення одиниці коефіцієнта АМ покладено метод, що полягає у формуванні АМ сигналу з огибаючою, близькою до синусоїдальної, установленні з високою точністю коефіцієнта АМ $m_H = 100\%$ і точному діленні модулюючої напруги для одержання каліброваних значень m у діапазоні 0,1 – 100 %.

АМ сигнал формується модуляторами з квазілінійними модуляційними характеристиками ($m = kU_{\Omega}$), як правило, на декількох фіксованих несучих частотах.

Для розширення діапазону несучих частот використовуються перетворювачі частоти, за допомогою яких здійснюється відтворення АМ сигналу на дискретних частотах у всьому діапазоні роботи модулометрів загального застосування (0,01 – 500 МГц).

Калібрування коефіцієнта АМ $m_H = 100\%$ здійснюється за допомогою характерної осцилограми (рис. 8.8) при максимальній чутливості вертикального підсилювача осцилографа, що входить до складу калібратора.

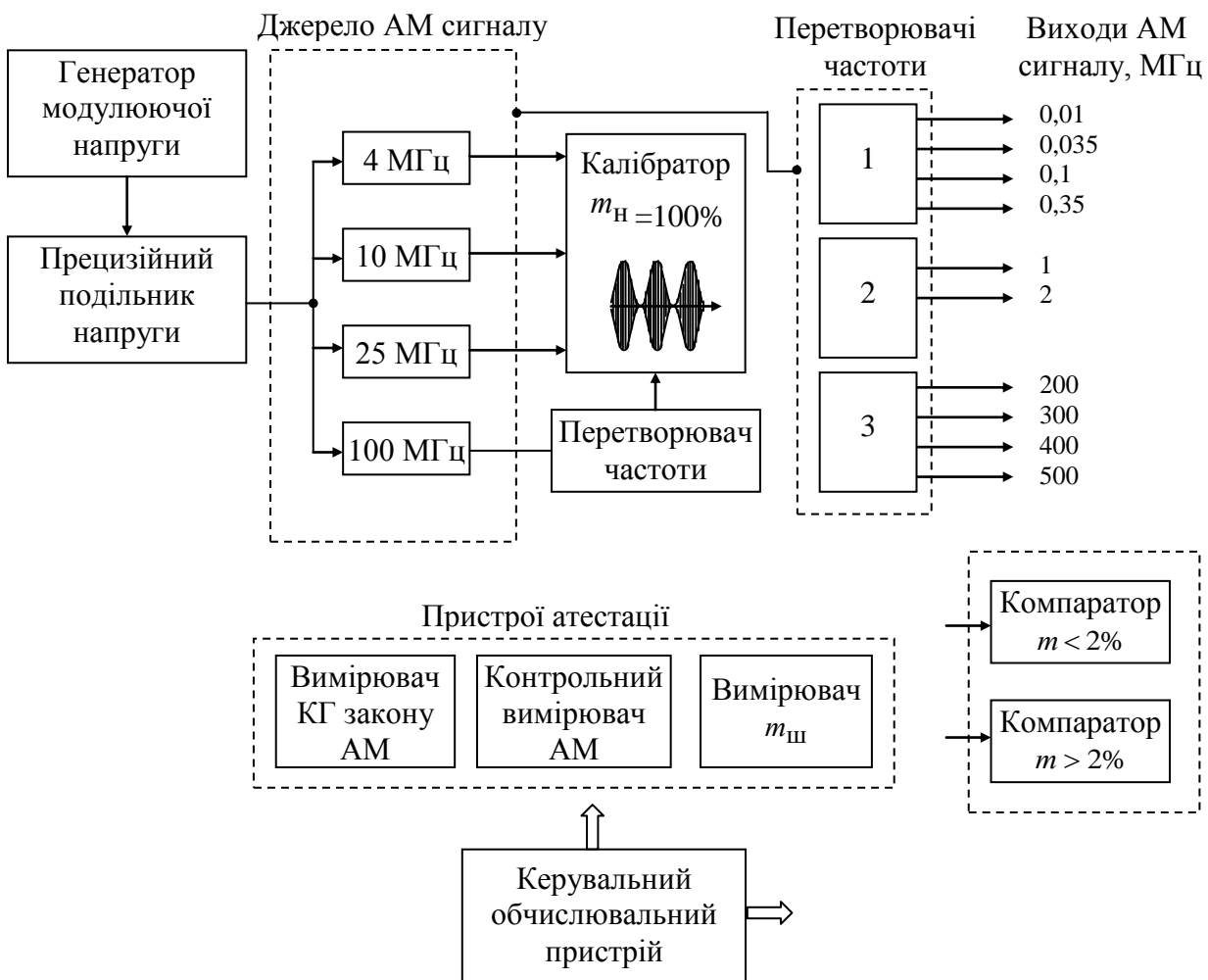


Рис. 8.7. Структурна схема ДЕ одиниці коефіцієнта АМ

Передача розміру одиниці коефіцієнта АМ робочим еталонам (які також є джерелами АМ сигналів) здійснюється за допомогою компаратора, на який по чергово подаються сигнали від державного і робочого еталонів. При повірці модулометрів (приймачів сигналу) еталонний сигнал подається безпосередньо на їхній вхід, минаючи компаратор, тобто повірка відбувається методом прямого вимірювання.

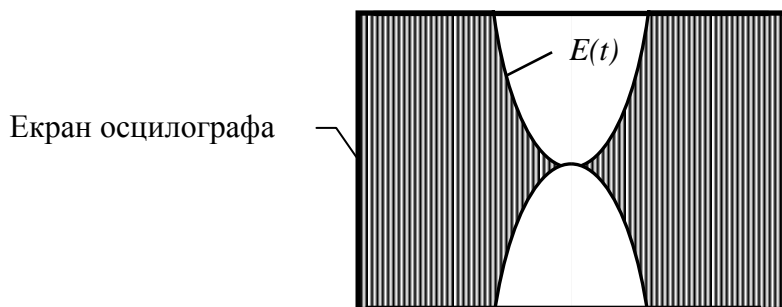


Рис. 8.8. Осцилограма АМ сигналу при $m_H=100\%$

До складу засобів атестації еталона входять додатковий вимірювач коефіцієнта АМ, у якому реалізується контрольний незалежний метод вимірювання середнього значення коефіцієнта АМ, а також пристрої для атестації АМ сигналів еталона по КГ і амплітудних шумах. Керування роботою еталона й обробка результатів здійснюються за допомогою керувально-обчислювального пристрою.

Джерелами похибок відтворення коефіцієнта АМ є:

нелінійні спотворення огинаючої АМ сигналу;

паразитна АМ шумового характеру;

неточність установлення $m_H = 100\%$;

похибка прецизійного подільника модулюючої напруги;

спотворення АМ сигналу в перетворювачах частоти.

При використанні компаратора додається також похибка останнього, яка носить, в основному, випадковий характер.

Державний еталон (рис. 8.9) має такі метрологічні характеристики:

діапазон несучих частот 0,01 – 500 МГц;

діапазон модулюючих частот 0,02 – 200 кГц;

діапазон значень коефіцієнта АМ 0,1 – 100 %;

НСП (θ_0) $(1-2) \cdot 10^{-3}$;

СКВ (S_0) $3 \cdot 10^{-4}$.

Як робочі еталони використовуються зразкові установки, що являють собою, як і ДЕ, джерела АМ сигналів із внутрішнім калібруванням їхнього коефіцієнта АМ.

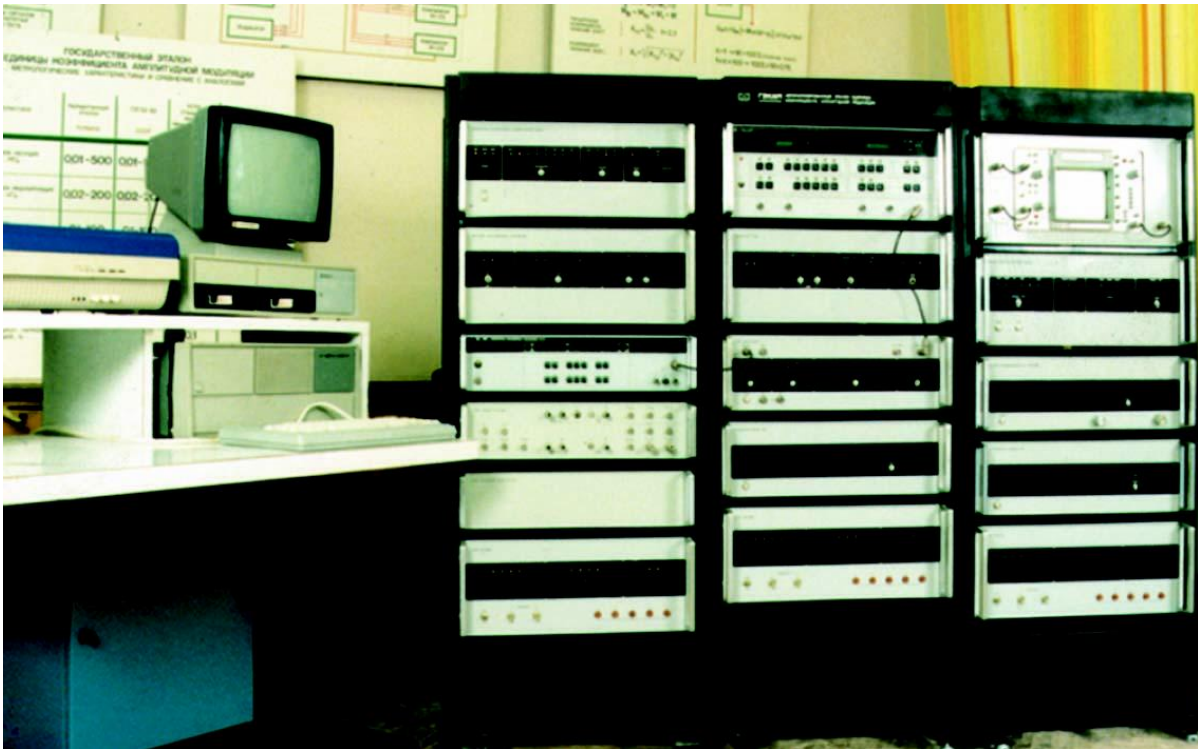


Рис. 8.9. Державний еталон одиниці коефіцієнта АМ

8.4 Еталон одиниці девіації частоти частотно-модульованих коливань

Еталон призначений для атестації робочих еталонів і перевірки найбільш точних робочих девіометрів. Являє собою комплекс засобів вимірювань, здатний відтворювати, зберігати і передавати калібровані значення девіації частоти ЧМ коливань у необхідному діапазоні несучих і модулюючих частот.

8.4.1 Параметри сигналу з кутовою модуляцією

Сигнал з кутовою модуляцією (КМ*) у загальному випадку має вигляд

$$u(t) = E \cos \left[\int_0^t \omega(\tau) d\tau \right] = E \cos \left[\omega_0 t + \int_0^t \Delta\omega(\tau) d\tau \right],$$

де E – амплітуда, прийнята постійною; ω_0 – несуча частота (частота у відсутності модуляції); $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t)$ – миттєва частота; $\Delta\omega(t)$ і $\int_0^t \Delta\omega(\tau) d\tau$ – закони зміни (модуляції) частоти і фази відповідно; $\tau \in [t, t + T]$.

При періодичній КМ середня частота за період модулюючого сигналу T буде (рис. 8.10)

* Під кутовою модуляцією розуміється частотна (ЧМ) або фазова (ФМ) модуляція.

$$\omega = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \omega(\tau) d\tau = \omega_0 + \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \Delta\omega(\tau) dt .$$

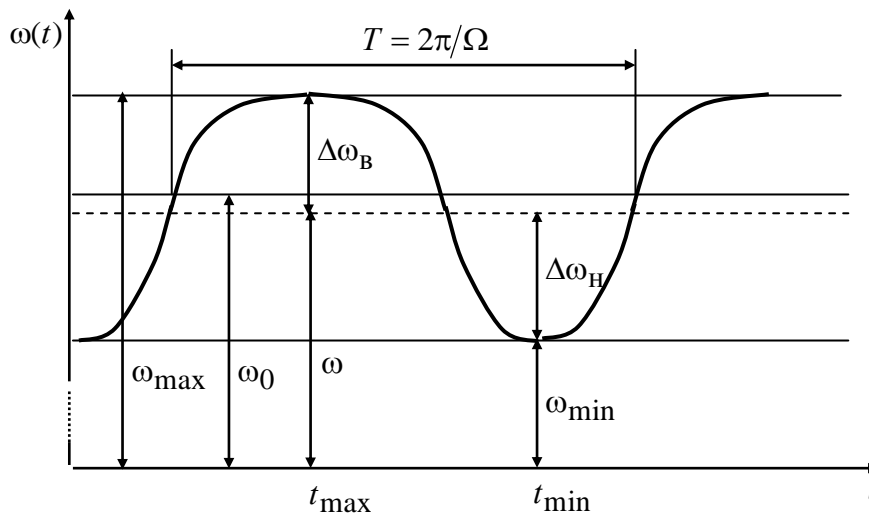


Рис. 8.10. Закон зміни частоти сигналу з КМ у функції часу

Середньоквадратичне значення девіації частоти за період T

$$\Delta\omega_{\text{СК}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \Delta\omega^2(\tau) d\tau} . \quad (8.11)$$

Екстремальні значення кутової частоти сигналу рівні

$$\begin{aligned} \omega_{\text{max}} &= \omega + \Delta\omega_{\text{В}}; \\ \omega_{\text{min}} &= \omega - \Delta\omega_{\text{Н}}, \end{aligned} \quad (8.12)$$

де $\Delta\omega_{\text{В}}$ і $\Delta\omega_{\text{Н}}$ називають кутовими девіаціями частоти (ДЧ) “вверх” і “вниз” відповідно.

Якщо значенням ω_{max} і ω_{min} відповідають моменти часу t_{max} і t_{min} (рис.

8.10), то величини $\int_0^{t+T} \Delta\omega(t_{\text{max}}) dt$ і $\int_0^{t+T} \Delta\omega(t_{\text{min}}) dt$ є девіації фази “вверх” і “вниз”.

У випадку гармонічної КМ миттєва частота сигналу

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t$$

$$i \quad u(t) = E \cos \left[\omega_0 t + \int_0^t \Delta\omega \cos \Omega \tau d\tau \right] = E \cos \left[\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t \right],$$

де $\Delta\omega$ - **девіація частоти**; $\frac{\Delta\omega}{\Omega} = \frac{\Delta f}{F} = \beta$ (8.13) - **індекс модуляції**, що дорівнює **девіації фази** $\Delta\phi$.

Як і при АМ, у випадку квазігармонічної кутової модуляції зі спотвореним законом (рис. 8.10) оперують поняттями парціальних девіацій частоти $\Delta\omega_i$ (де-

віацій фази $\Delta\varphi_i$), а для оцінки нелінійних спотворень закону КМ використовують коефіцієнт гармонік. Так, для сигналу зі спотвореною КМ

$$u(t) = E \cos\left[\omega_0 t + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta\omega_i}{i\Omega} \sin(i\Omega t + \varphi_i)\right]$$

вирази для миттєвої частоти, девіацій частоти і девіацій фази мають вигляд

$$\omega(t) = \omega_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \Delta\omega_i \cos(i\Omega t + \varphi_i);$$

$$\Delta\omega_B(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta\omega_i \cos(i\Omega t_{\max} + \varphi_i);$$

$$\Delta\omega_H(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta\omega_i \cos(i\Omega t_{\min} + \varphi_i);$$

$$\Delta\varphi_B = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta\omega_i}{i\Omega} \sin(i\Omega t_{\max} + \varphi_i);$$

$$\Delta\varphi_H = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta\omega_i}{i\Omega} \sin(i\Omega t_{\min} + \varphi_i).$$

Коефіцієнт гармонік визначається формулою

$$K = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \Delta\omega_i^2}}{\Delta\omega_1} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} K_i^2}, \quad (8.14)$$

де $K_i = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta\omega_1}$ – парціальні коефіцієнти i -ї гармоніки.

Крім корисної кутової модуляції реальний сигнал завжди супроводжується паразитною КМ флюктуаційного (шумового) характеру, що може нормуватися у формі паразитної девіації частоти (частотного шуму) у смузі частот від F_{\min} до F_{\max} :

$$\Delta f_{\text{ш}} = \sqrt{\int_{F_{\min}}^{F_{\max}} S_f(F) dF}, \quad \text{Гц} \quad (8.15)$$

або паразитної девіації фази (фазового шуму)

$$\Delta\varphi_{\text{ш}} = \sqrt{\int_{F_{\min}}^{F_{\max}} S_{\varphi}(F) dF}, \quad \text{рад}, \quad (8.16)$$

де S_f і S_{φ} – спектральна густина потужності флюктуацій частоти ($\text{Гц}^2/\text{Гц}$) і фази ($\text{рад}^2/\text{Гц}$) відповідно.

Частотний (фазовий) шум є абсолютною похибкою відтворення корисної девіації частоти (девіації фази).

Оскільки на практиці з двох різновидів КМ частіше застосовується частотна модуляція, ніж фазова, то більш доцільно створювати еталон основного параметра частотної модуляції – девіації частоти.*

8.4.2 Апаратурне рішення і характеристики еталона

В основу еталона одиниці девіації частоти покладено такі принципи [28]:

- а) як і у випадку АМ, еталон доцільно будувати як міру девіації частоти, тобто як джерело сигналу з гармонічною ЧМ і каліброваною девіацією частоти;
- б) діапазони девіації частоти і модулюючої частоти повинні відповідати параметрам апаратури, що повіряється, несуча частота може бути будь якою;
- в) до складу еталона повинні входити засоби атестації еталонного ЧМ сигналу по паразитних параметрах (K_T , супровідна АМ, $\Delta f_{ш}$), оскільки вони є основними джерелами похибки еталона.

Структурну схему державного еталона одиниці девіації частоти, створеного в Україні, наведено на рис. 8.11.

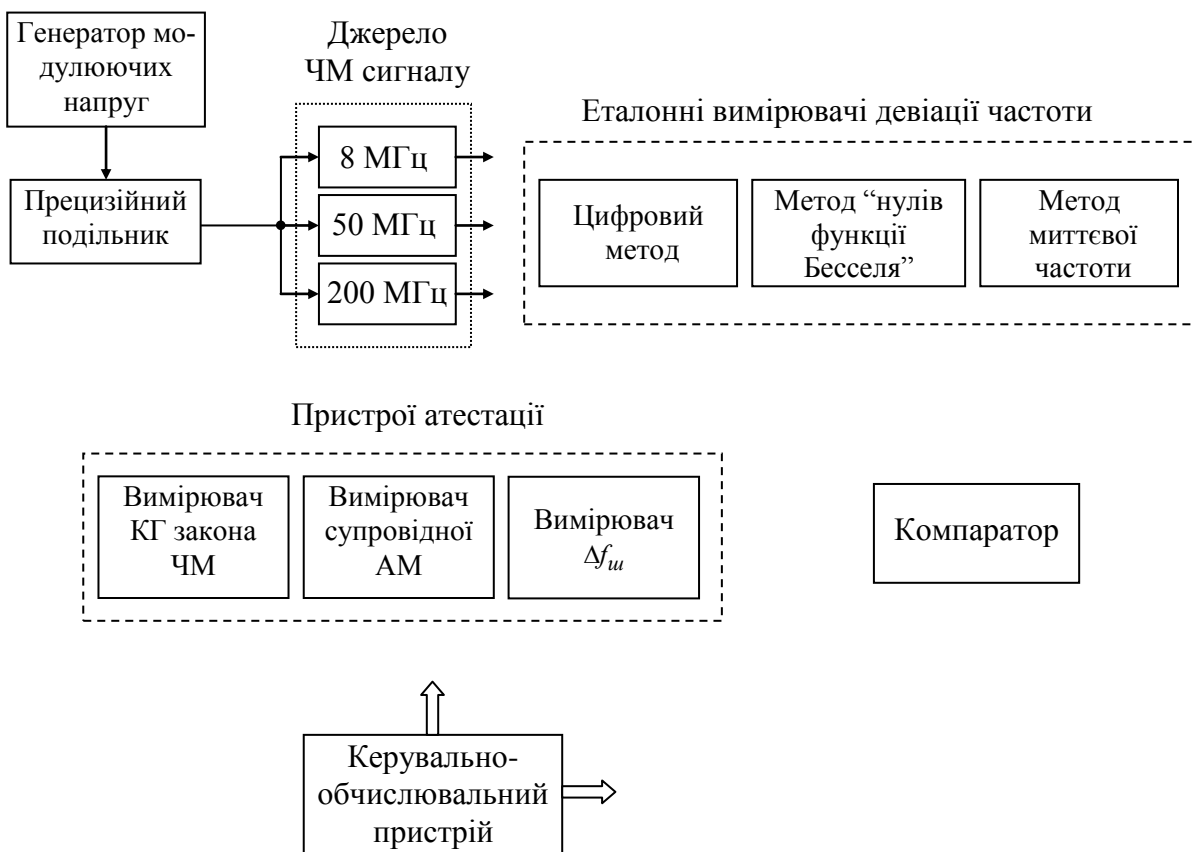


Рис. 8.11. Структурна схема еталона одиниці девіації частоти ЧМ сигналу

* Від девіації частоти можна легко перейти до девіації фази і проводити перевірку (атестацію) і вимірювачів ФМ.

Джерело ЧМ сигналу генерує сигнал

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \frac{\Delta f}{F} \sin 2\pi F t)$$

і забезпечує одержання девіації частоти Δf від 1 Гц до 1 МГц у смузі модулюючих частот F від 0,02 до 200 кГц (діапазони Δf і F , в яких працюють вимірювачі ЧМ загального застосування). Для одержання такого сигналу і забезпечення малих значень паразитних параметрів потрібно було створення трьох генераторів на частотах 8, 50 і 200 МГц.

Девіація частоти ЧМ сигналів вимірюється за допомогою еталонних вимірювачів, в яких реалізовано три найбільш точні методи:

цифровий (лічильний), який полягає в підрахунку числа періодів досліджуваного сигналу (обробленого спеціальним чином) протягом зразкового інтервалу часу;

спектральний, що ґрунтується на властивостях спектра ЧМ сигналу (“метод нулів функції Бесселя”);

метод миттєвої частоти, що полягає у вимірюванні максимальної і мінімальної миттєвих частот ЧМ сигналу.

Застосування трьох методів в еталоні необхідно тому, що кожний з методів забезпечує високу точність лише в обмеженому діапазоні девіацій частоти [45].

До складу засобів атестації входять вимірювачі КГ закону ЧМ, супровідної АМ і паразитної девіації частоти, побудова яких являє собою самостійну задачу.

Передача розміру одиниці девіації частоти від еталона до робочого еталона здійснюється за допомогою компаратора. Повірка девіометра (вимірювального приймача) здійснюється безпосередньою подачею на нього еталонного сигналу, тобто методом прямого вимірювання.

Керування усіма вимірювальними операціями й обробка результатів вимірювань здійснюються за допомогою керувально-обчислювального пристрою на базі ПЕОМ.

Метрологічні характеристики еталона визначаються як параметрами ЧМ сигналу, так і еталонними вимірювачами девіації частоти. Основними методами вимірювання є цифровий (лічильний) і спектральний “метод нулів Бесселя”, тому розглянемо їх докладніше.

Спрощену структурну схему, за якою реалізується лічильний метод, наведено на рис. 8.12 [45].

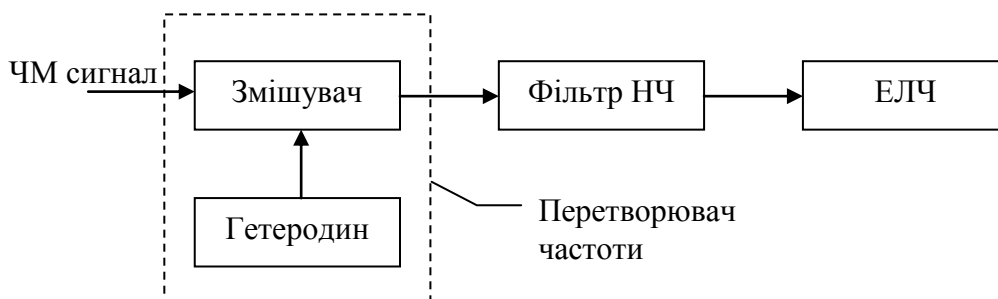


Рис. 8.12. Структурна схема реалізації лічильного метода

ЧМ сигнал з гармонічною модуляцією змішується із сигналом гетеродина, на виході перетворювача частоти виділяється сигнал різницевої частоти

$$u(t) = U_m \cos[(\omega - \omega_r)t + \Delta\omega \cos \Omega t],$$

а також виконується умова, що $\omega - \omega_r = \omega_{пч} \ll \Delta\omega$.

Цей сигнал подається на стандартний електронно-лічильний частотомір (ЕЛЧ). Накопичення фази ЧМ сигналу за період $T = \frac{2\pi}{\Omega}$ буде

$$\psi = \int_0^T (\omega_{пч} + \Delta\omega \cos \Omega t) dt,$$

а кількість проходжень фази через 2π (які рахує ЕЛЧ)

$$N_\Omega = \frac{\psi}{2\pi} = \text{ent} \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^T (\omega_{пч} + \Delta\omega \cos \Omega t) dt \right],$$

де ent – символ цілого чисельного значення.

Рішення цього інтеграла приводить до виразу [45]

$$N_\Omega = \text{ent} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\Omega\pi} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{пч}}{\Delta\omega} \right)^2} - \frac{\omega_{пч}}{\Delta\omega} \right] \right\} + \text{ent} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\Omega\pi} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{пч}}{\Delta\omega} \right)^2} + \frac{\omega_{пч}}{\Delta\omega} \left(\pi - \arccos \frac{\omega_{пч}}{\Delta\omega} \right) \right] \right\}.$$

Якщо $\frac{\Delta\omega}{\Omega\pi}$ – велике число (тобто при великих індексах модуляції),

$$N_\Omega = 2 \frac{\Delta\omega}{\Omega\pi} = 2 \frac{\Delta f}{F\pi}.$$

Показ ЕЛЧ за 1 с (час рахування стандартного ЕЛЧ) N можна одержати, помноживши N_Ω на F :

$$N = 2 \frac{\Delta f}{F\pi} F = 2 \frac{\Delta f}{\pi}, \quad (8.17)$$

тобто ЕЛЧ рахує величину, пропорційну девіації частоти.

Як показано в [45], при $\omega_{пч} \ll \Delta\omega$ і $\omega_{пч} \neq 0$ ця рівність справедлива і при малих індексах модуляції, тобто коли $\frac{\Delta\omega}{\Omega\pi}$ – будь-яке число.

Другий метод ґрунтується на властивостях спектрального розкладу ЧМ сигналу з гармонічною модуляцією, що, як відомо, має вигляд (рис. 8.13)

$$u(\omega) = U_m \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} J_\lambda(\beta) \sin(\omega + \lambda\Omega)t,$$

де $J_\lambda(\beta)$ – функція Бесселя першого роду λ -го порядку.

Амплітуда λ -ї спектральної складової

$$U_\lambda = U_m J_\lambda(\beta) . \quad (8.18)$$

Бесселева функція є квазіперіодичною загасаючою функцією (див. рис. 8.14), корені якої (перетинання з віссю β) табульовані з високою точністю. Таким чином, реєструючи рівність

$$U_m J_\lambda(\beta) = 0 ,$$

можна встановлювати $\beta = \beta_{0n}$, де β_{0n} – n -й “нуль” λ -ї спектральної складової.

Оскільки n і λ нам відомі, β_{0n} знаходиться за таблицями функцій Бесселя [45], а шукана девіація визначається за формулою $\Delta f = \beta_{0n} F$ (модулююча частота F може бути виміряна досить точно).

Практично метод реалізується шляхом реєстрації за допомогою спектрального індикатора (наприклад, стандартного аналізатора спектра) обертання в нуль тієї чи іншої складової спектра ЧМ сигналу (рис. 8.13).

Звичайно для вимірювань використовується складова з несучою частотою ($\lambda = 0$), тобто реєструється рівність

$$U_m J_0(\beta) = 0 , \quad (8.19)$$

яка має місце при $\beta_{0n} = 2,4048; 5,5201; 8,6537; 11,7915; 14,9309; 18,0711$ і т.д. [45].

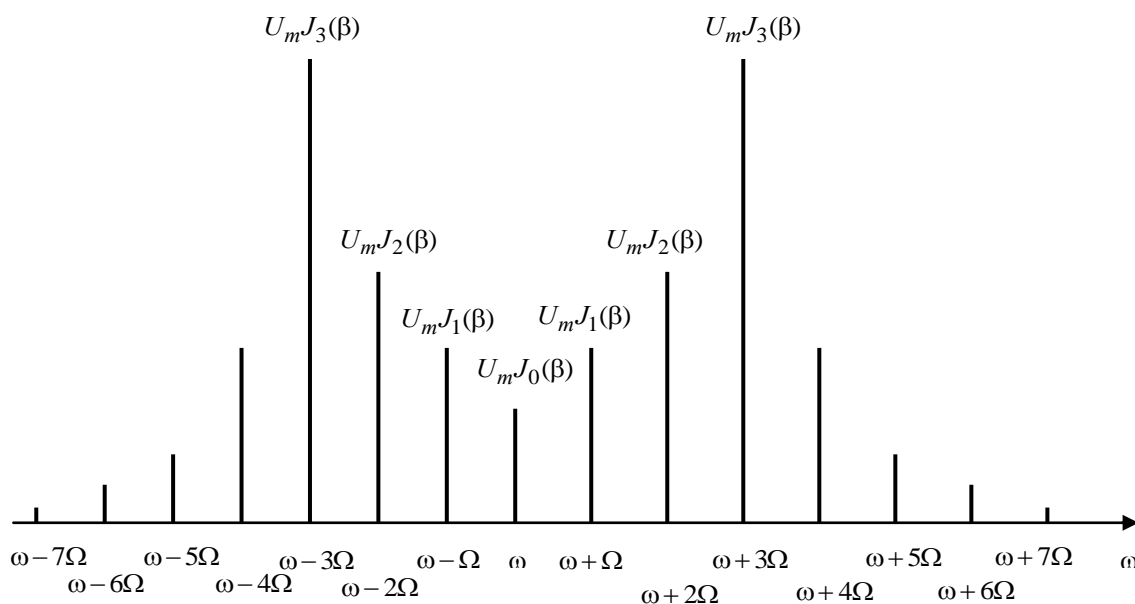


Рис. 8.13. Спектральний розклад ЧМ сигналу (амплітудний спектр)

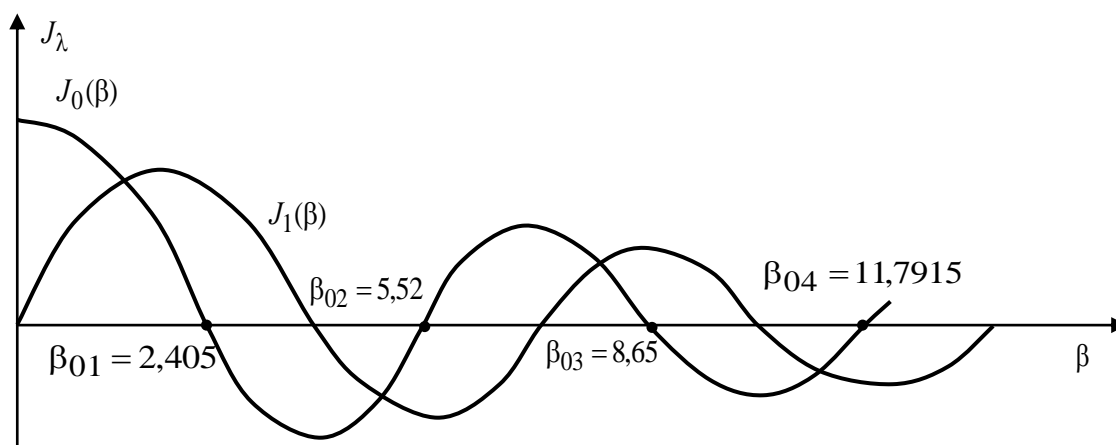


Рис. 8.14. Функції Бесселя $J_0(\beta)$, $J_1(\beta)$

Лічильний метод забезпечує найвищу точність в області середніх і великих індексів модуляції β , метод “нулів функції Бесселя” – в області малих β . Метод миттєвої частоти відіграє роль контрольного. Наявність кількох незалежних методів дозволяє проводити їхнє взаємне звірення, тобто контролювати відсутність неврахованих джерел систематичної похибки.

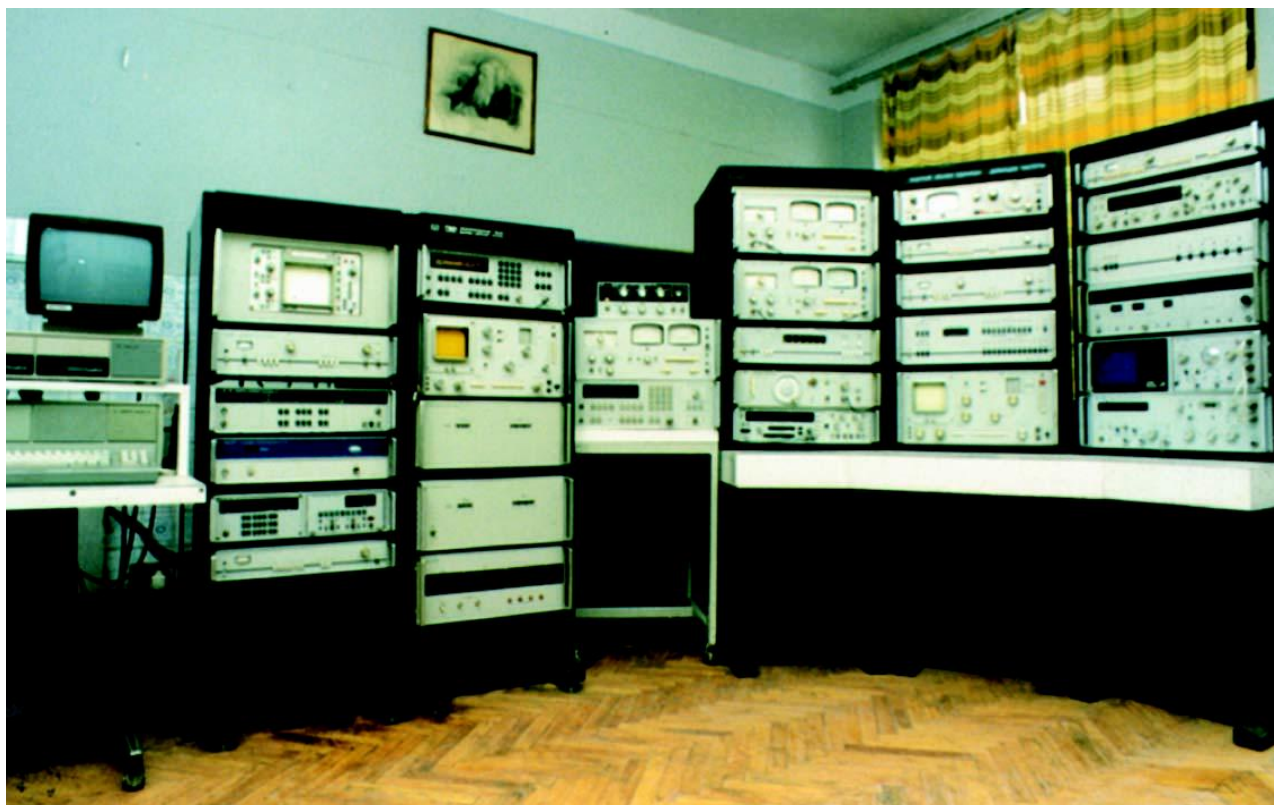


Рис. 8.15. Державний еталон одиниці девіації частоти ЧМ коливань

Основними складовими похибки еталона є:

- похибки внаслідок неідеальності еталонного ЧМ сигналу (наявність КГ

закону ЧМ, супровідної АМ, паразитної ЧМ);

- похибки еталонних вимірювачів ДЧ;
- похибки компарування.

Наведемо основні метрологічні характеристики державного еталона України (рис. 8.15):

діапазон несучих частот, МГц	0,1 – 10000;
діапазон модулюючих частот, кГц	0,02 - 200;
діапазон девіації частоти, Гц	1– 10 ⁶ ;
НСП (θ_0)	(0,5–2)·10 ⁻³ ;
СКВ (S_0)	(3–5)·10 ⁻⁴ .

Як робочі еталони одиниці девіації частоти в СНД застосовуються зразкові установки К2-38, К2-44, К2-54, які є джерелами ЧМ сигналів з каліброваними девіаціями частоти і малими значеннями паразитних параметрів.

8.5 Метрологічне забезпечення вимірювальних генераторів

Як показано в п. 8.1.2, група Г включає до себе ряд видів генераторів, але підхід до їх метрологічного забезпечення є єдиним. Розглянемо його на прикладі приладу підгрупи Г4 – генератора сигналів вимірювального.

У генератора нормована велика кількість параметрів, які розбиті на такі основні групи:

- частотні – F - параметри;
- рівня вихідного сигналу – U або P - параметри;
- амплітудної модуляції – AM - параметри;
- частотної модуляції – FM - параметри;
- імпульсної модуляції – IM - параметри.

Основні параметри, які нормуються в кожній групі, наведено на рис. 8.16. Для ВЧ і НВЧ генераторів вказують також параметри входу-виходу (імпеданс, тип з'єднання, КСХН тощо).

Аналіз показує, що всі F - параметри генератора можуть бути визначені за допомогою стандартних засобів вимірювання частотно-часових параметрів, які, в свою чергу, прив'язані (простежуються) до еталона часу-частоти.

Аналогічно, всі U та P - параметри вимірюються за допомогою стандартних вимірювачів напруги і потужності.

Щодо AM і FM - параметрів – їх визначення забезпечується вимірювачами амплітудної і частотної модуляції (підгрупи С2 і С3). Нормування в цих приладах власного КГ законів АМ і ЧМ дозволяє вимірювати КГ при АМ і ЧМ сигналів генераторів, оскільки КГ модулометрів значно менше нормованих КГ генераторів. У свою чергу, прилади С2 і С3 повіряються за допомогою відповідних еталонів, розглянутих вище.

IM - параметри генераторів визначаються за допомогою приладів підгрупи И1 – “Установки або прилади для перевірки приладів для імпульсних вимірювань”, а також за допомогою засобів вимірювання частоти і рівня.

<i>F</i> -параметри	<i>U, P</i> -параметри	<i>AM</i> -параметри	<i>FM</i> -параметри	<i>IM</i> -параметри
Діапазон частот	Границі рівня сигналу	Частоти модуляції	Частоти модуляції	Частота імпульсів
Похибка частоти	Похибка рівня	Діапазон <i>КАМ</i>	Діапазон границі <i>ДЧ</i>	Похибка частоти
Нестабільність частоти	Нестабільність рівня	Похибка <i>КАМ</i>	Похибка <i>ДЧ</i>	Тривалість імпульсів
Паразитні параметри	Опорний рівень	<i>КГ</i> закону <i>АМ</i>	<i>КГ</i> закону <i>ЧМ</i>	Похибка тривалості
	Паразитна <i>АМ</i>	Паразитна <i>ЧМ</i>	Паразитна <i>АМ</i>	Форма імпульсів
	Коефіцієнт гармонік	Зовнішня <i>АМ</i>	Зовнішня <i>ЧМ</i>	Зовнішня <i>ІМ</i>

Рис. 8.16. Система нормування метрологічних характеристик вимірювального генератора

Схема метрологічного забезпечення генераторів (рис. 8.17) є класичним прикладом децентралізованої системи, коли для забезпечення єдності вимірювань використовуються еталони з інших повірочних схем.

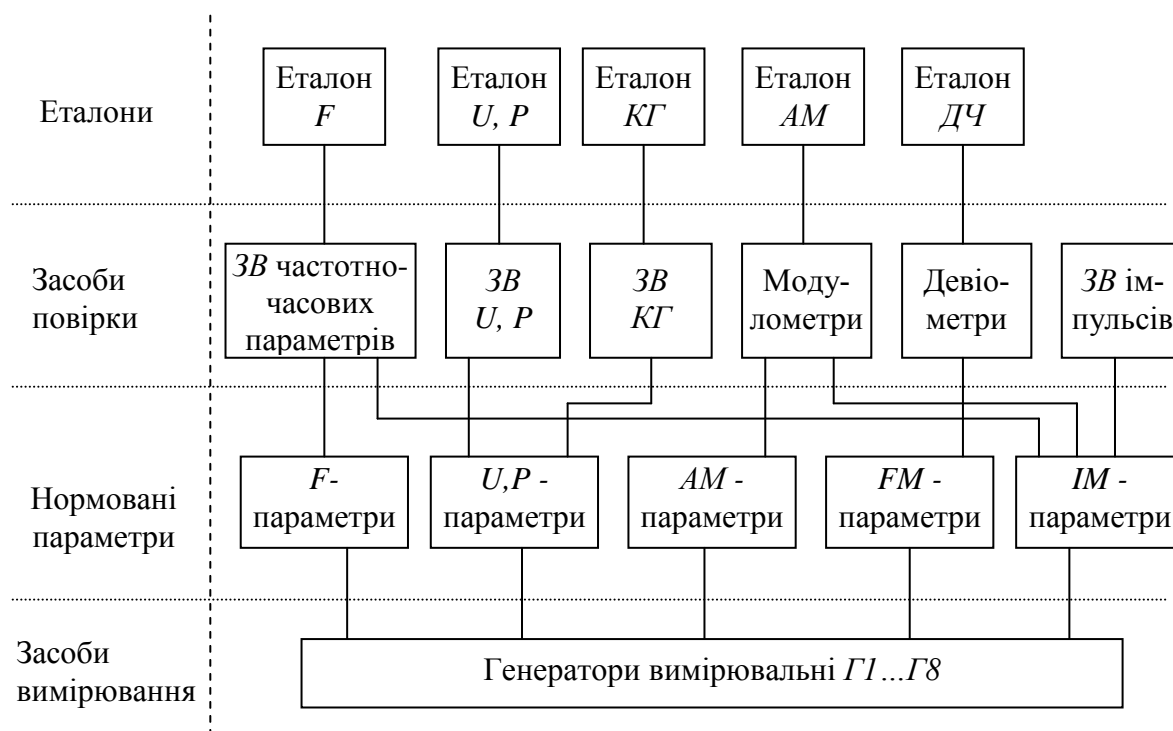


Рис. 8.17. Схема метрологічного забезпечення вимірювальних генераторів сигналів

Такий спосіб повірки називають також поелементним. Неважко бачити, що при коректно організованій децентралізованій системі всі вимоги щодо простежуваності результатів вимірювання виконуються.

8.6 Про метрологічне забезпечення осцилографів, аналізаторів спектра та інших багатофункціональних засобів вимірювань

Вище вже говорилося про особливості цих приладів, у яких нормуються кілька десятків внутрішніх параметрів і характеристик, за якими, у залежності від вимірювальної задачі, можна розрахувати похибку вимірювання тієї чи іншої величини. Аналіз показує, що всі нормовані параметри цих приладів можна розділити на такі групи: частотні, амплітудні, параметри спотворень, параметри входу-виходу.

У принциповому плані їх метрологічне забезпечення (повірка) не відрізняється від повірки генераторів сигналів, яка проводиться поелементно за допомогою електро- і радіовимірювальних приладів, що дозволяє визначити більшість параметрів. Однак залишається ряд параметрів, вимірювання яких не забезпечується даними приладами, оскільки вони нормуються в іншій формі. Для аналізаторів спектра – це параметри спотворень (динамічний діапазон, рівень інтермодуляційних, комбінаційних, гармонічних завад і т.і.), амплітудні параметри (похибки вимірювання рівнів і відношень рівнів спектральних складових, АЧХ і ін.), для осцилографів – перехідна характеристика, АЧХ, ФЧХ і деякі інші.

Це ж відноситься і до деяких спеціалізованих приладів для вимірювання параметрів сигналів, що застосовуються, наприклад, у техніці зв'язку.

У деяких спеціальних приладах нелінійності нормуються у формі диференційних крутизни і фази, шумів нелінійних переходів, перехідного шуму й ін.

Задача метролога в цьому випадку полягає в коректному перерахунку нормованого “екзотичного” параметра в параметр, загальноприйнятий у радіовимірюваннях, зокрема, параметра нелінійності – у коефіцієнт гармонік. Іноді для цього потрібно проводити спеціальний аналіз, розробку методу й апаратури. Якщо ж ця задача успішно вирішена, залишається лише коректно застосувати той чи інший прилад, “прив'язаний”, у свою чергу, до відповідного еталона загальноприйнятої ФВ. Так реалізується простежуваність до того чи іншого еталона. Таким чином, для цих приладів схема, наведена на рис. 8.17, залишається в силі і лише доповнюється ще однією ланкою – перетворенням деяких параметрів у загальноприйнятий в електрорадіовимірюваннях.

Додамо, що для повірки деяких приладів, зокрема окремих типів осцилографів, створені соціалізовані прилади підгрупи И1, які поєднують функції кількох приладів, що не міняє суті підходу.

8.7 Висновок

Вимірювання і відтворення параметрів електричних і радіотехнічних сигналів здійснюється відповідними засобами вимірювальної техніки, особливостями

яких є велика кількість нормованих параметрів і можливість роботи з різними видами сигналів. Єдність вимірювань при цьому досягається сполученням централізованих та децентралізованих систем метрологічного забезпечення. Для таких приладів, як вимірювачі нелінійних спотворень, амплітудної і частотної модуляції, де визначено основний параметр і вид сигналу, можливою є централізована система, тобто створення відповідного еталона. Для багатофункціональних приладів, призначених для вимірювання комплексу параметрів різних видів сигналів єдність забезпечується шляхом простежуваності до еталонів з інших видів вимірювань, тобто децентралізовано.

Контрольні питання

1. Які прилади загального застосування для вимірювання параметрів електричних сигналів ви знаєте?
2. Які прилади включає до себе підгрупа Г – генератори сигналів вимірювальні?
3. Що таке “нелінійні спотворення” сигналів, чим вони відрізняються від лінійних?
4. Якими параметрами характеризуються нелінійні спотворення сигналів?
5. Які вимоги повинні виконуватися для забезпечення єдності вимірювань нелінійних спотворень?
6. Що таке коефіцієнт гармонік?
7. Що таке модуляція?, амплітудна модуляція?, частотна модуляція?
8. Які параметри нормуються для АМ сигналу, ЧМ сигналу?
9. Що таке коефіцієнт АМ?
10. Що таке девіація частоти?
11. На якому принципі побудовано еталони параметрів АМ і ЧМ?
12. Які параметри нормуються у вимірювальних генераторах сигналів?
13. Як організується метрологічне забезпечення генераторів сигналів?
14. Що ви можете сказати про метрологічне забезпечення багатофункціональних засобів вимірювання (осцилографів і аналізаторів спектра)?

9 ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ

9.1 Перспективи вдосконалення системи одиниць SI

Одним із наріжних каменів існування і розвитку системи забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі є наявність загально визнаної системи одиниць та її вдосконалення. Хоча система SI існує багато років і доказала свою життєвість, вона постійно змінюється і уточнюється. За останні 50 років змінилися визначення ряду основних одиниць (секунди, двічі – метра і кандели), періодично уточнюються міжнародна температурна шкала, спростовані додаткові одиниці (радіан та стерадіан) тощо. Основною тенденцією цих змін є наближення визначень одиниць до природних інваріантів* і посилення зв'язку з фундаментальними сталими.

І от на черзі нова суттєва зміна: на 94-му засіданні в жовтні 2005 р. Міжнародний комітет з мір та ваг прийняв рекомендацію щодо підготовчих заходів з перевизначення кілограма, ампера, кельвіна і моля таким чином, щоб ці одиниці були прив'язані до точно відомих значень фундаментальних сталих. Основними передумовами такого перевизначення є наступні фактори.

При розробці визначення основної одиниці, як вже було сказано, дуже важливо пов'язати її з природним інваріантом. Серед інших властивостей основних одиниць повинна бути можливість практичної реалізації їх визначення “в будь-якому місці, в будь-який час і з тією точністю, яку потребує суспільство”.

Сьогодні стан з системою SI такий, що із семи основних одиниць тільки секунда і метр напряму пов'язані з істинними інваріантами, оскільки секунда визначається через період, що відповідає частоті надтонкого переходу цезію-133, а метр – через швидкість світла у вакуумі (з використанням секунди). Можна вважати також канделу прив'язаною до природного інваріанту – спектральній силі світлового потоку монохроматичного випромінювання на частоті максимальної чутливості людського ока ($540 \cdot 10^{12}$ Гц), що дорівнює точно 683 лм/Вт. Кельвін визначається на основі точно заданого термодинамічного стану води, яке хоч і є природним інваріантом, але має термодинамічну температуру значною мірою залежну від вмісту домішок та ізотопного складу даного об'єму води. Це ускладнює ситуацію і обмежує точність, з якою це визначення може бути реалізовано.

Визначення інших основних одиниць має ще більш серйозні недоліки. Кілограм досі визначається за допомогою “артефакту”** – того самого прототипу, прийнятого 1-ю Генеральною конференцією з мір та ваг у 1889 р. Його маса, як відомо, дрейфує по відношенню до істинного інваріанту, однак цей дрейф фактично неможливо оцінити, оскільки всі зразки цієї гирі були відлиті з одного сплаву в одній плавці і на одному підприємстві, тобто дрейфують “в одному напрямку”. Недоліки визначення ампера, моля і кандели, в основному, поляга-

* Інваріант – тут незмінне природне явище, стабільний фізичний ефект.

** Артефакт – тут унікальний виріб рук людини.

ють в їх залежності від визначення кілограма, хоча мають місце й інші проблеми.

Таким чином, визначення кілограма через істинний природний інваріант – масу атома або фундаментальну фізичну сталу – широко обговорюється вченими -метрологами щонайменше 30 останніх років, що відображено у ряді резолюцій ГКМВ, матеріалах МКМВ та його Консультативних комітетів. Не дивлячись на різні думки з цього питання, більшість з них зводиться до необхідності перевизначення кілограма і прийняття в якості еталонної величини або сталої Планка, або числа Авогадро.

Другою передумовою перевизначення кілограма стали практичні успіхи ряду національних метрологічних інститутів (НМІ) в реалізації кілограма різними методами з простежуваністю до фундаментальних сталих. Хоча ці методи ще не дають необхідної точності, але існує перспектива її досягнення.

Ще одною передумовою пере визначення одиниць через ФФС стали успіхи НМІ у підвищенні точності визначення ряду ФФС, що є обов'язковою умовою перевизначення одиниць через ці ФФС, а також досягнення в практичній реалізації ряду методів відтворення одиниць, що базуються на квантових ефектах і ФФС (квантові ефекти Джозефсона, Холла, ядерного магнітного резонансу та деякі інші).

Сукупність цих факторів привела до того, що 23 засідання ГКМВ (2007 р.) прийняла Резолюцію 12 “Про можливе перевизначення певних основних одиниць Міжнародної системи SI”. Рішення про перевизначення повинно прийматись на рівні Генеральної конференції з мір та ваг. Розглянемо суть цієї рекомендації.

Ще з 80-х р. минулого століття, в період підготовки до введення нового визначення метра, значно зріс інтерес до використання фундаментальних фізичних сталих в метрології, зокрема, для побудови систем одиниць. Подальші роки характеризуються активним розвитком робіт у цьому напрямку в багатьох країнах.

У 2005 р. Президент Консультативного комітету з одиниць професор Міллс з колегами запропонував перевизначити одиницю маси шляхом фіксації або сталої Планка, або сталої Авогадро. У подальшому в публікації МБМВ і статті Міллса [46] було запропоновано деякі варіанти нових визначень чотирьох одиниць: кілограма, ампера, кельвіна і моля (табл. 9.1). Ці визначення потребують фіксації чотирьох ФФС: сталої Планка h , елементарного електричного заряду e , сталої Больцмана k , сталої Авогадро N_A (у доповнення до зафіксованого раніше значення швидкості світла c). При цьому автори виходять з чотирьох умов, які повністю збігаються з рекомендаціями МКМВ – 2005 р.:

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. Автори вважають, що для метрології і науки в цілому переваги від заміни сучасних визначень визначеннями через сталі значно перебільшують 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 вибирати таким чином, щоб з'явилися переваги як для метрології, так і для науки в цілому;

4) нове визначення одиниці не повинно призводити до розриву в її значеннях. Це означає, що обрані значення сталої Планка h , елементарного електричного заряду e , сталої Больцмана k і сталої Авогадро N_A мають бути настільки близькі до їх значень в SI, наскільки це дозволяють сучасні знання.

Таблиця 9.1
Визначення 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 $\frac{299292458}{66260693}10^{41}$ Гц (кг-1b) Кілограм є масою тіла, для якого частота де Бройля-Комптона точно дорівнює $\frac{299292458}{66260693}10^{41}$ Гц	(А-1) Ампер є сила електричного струму, у напрямку потоку, який містить 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
Визначення через сталі	(кг-2) Кілограм є одиницею масою такою, що стала Планка дорівнює точно $6,6260693$ 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. 9.1, для кожної з одиниць даються 2 варіанти визначень, які автори називають: перше – явним, друге – через сталі (для кілограма даються два варіанти явного визначення). Заключний вибір формулювання має бути зроблений МКМВ.

Розглянемо їх коротко.

9.1.1 Явні визначення одиниць

1.1 Кілограм. Пропонується два формулювання явного визначення кілограма, але вони приводять до близьких результатів. У першому з них (кг-1a) еквівалентна енергія тіла масою 1 кг прирівнюється до енергії деякого числа фотонів. В другому (кг-1b) визначене значення “комптонівської частоти” (частоти де Бройля-Комптона) присвоюється тілу масою в 1 кг.

Всі ці значення базуються на фіксації сталої Планка.

1.2 Ампер (А-1). Амперу дається досить пряме визначення, яке зв'язує ампер з точним значенням e .

1.3 Кельвін (К-1). В 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.

1.4 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.

9.1.2 Визначення через сталі

Визначення через сталі просто констатують, що одиниця визначається заданням точного значення якоїсь фундаментальної сталої. Запропоновані визначення мають загальну конструкцію:

[найменування одиниці] є така одиниця [найменування величини], що [найменування фундаментальної сталої] дорівнює точно [значення сталої].

Автори вважають перевагою такого визначення простоту, коротке формулювання, явне позначення тієї ФФС, до якої прив'язана одиниця, і фіксація точного значення цієї сталої. Якщо будуть прийняті такі визначення, то, як вважають автори, цей підхід логічно застосувати для всіх семи основних одиниць. Очевидно, що такі визначення в значній мірі відрізняються від сучасного способу явного визначення основних одиниць, що може стати предметом дискусії.

9.2 Рішення 24 засідання ГКМВ (2011 р.)

Запропоновані перевизначення були винесені на 24 засідання ГКМВ, яка повинна була прийняти принципове рішення про їх введення, а також про їх формулювання.

24 засідання ГКМВ констатувало, що робота іде успішно, але не всі вимоги резолюції, прийнятої на 23 засіданні, виконані, тому «неможливо прийняти кінцеве рішення, але можна вже зараз подати чітке викладення того, що необхідно зробити».

ГКМВ підтвердила незмінність своєї позиції щодо необхідності перевизначення кілограма, ампера, кельвіна і моля. При перевизначенні кілограма віддала перевагу його прив'язці до сталої Планка, а при виборі нових визначень – визначенням через сталі.

Цитуємо витяг з резолюції 24 засідання ГКМВ (російською мовою, як од-

нією з мов ГКМВ):

Международная система единиц (СИ) будет системой единиц, в которой:

- частота сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu$, точно равна $9\,192\,631\,770$ Гц,
- скорость света c в вакууме точно равна $299\,792\,458$ м/с,
- постоянная Планка h точно равна $6,626\,06X \times 10^{-34}$ Дж·с,
- элементарный заряд e точно равен $1,602\,17X \times 10^{-19}$ Кл,
- постоянная константа Больцмана k точно равна $1,380\,6X \times 10^{-23}$ Дж/К,
- постоянная Авогадро N_A , равна $6,022\,14X \times 10^{23}$ моль⁻¹,
- спектральная сила светового потока K_{cd} монохроматического излучения с частотой 540×10^{12} Гц, точно равна 683 лм/Вт,

где

знак X в данном Проекте резолюции обозначает одну или более дополнительные цифры, которые будут добавлены к численным значениям h , e , k , N_A , с использованием последних корректировок данных КОДАТА, из чего следует, что в системе СИ по-прежнему будет существующий в настоящее время набор из семи основных величин, в частности:

- килограмм по-прежнему будет оставаться единицей массы, но ее размер будет установлен посредством фиксированного численного значения постоянной Планка, равной точно $6,626\,06X \times 10^{-34}$ Дж·с,

- ампер по-прежнему будет оставаться единицей электрического тока, но ее размер будет установлен посредством фиксированного численного значения элементарного заряда, равного точно $1,602\,17X \times 10^{-19}$ Кл,

- кельвин по-прежнему будет оставаться единицей термодинамической температуры, но ее размер будет установлен посредством фиксированного численного значения постоянной Больцмана, равной точно $1,380\,6X \times 10^{-23}$ Дж/К,

- моль по-прежнему будет оставаться единицей количества вещества определенной элементарной структуры, которая может быть атомом, молекулой, ионом, электроном и любой другой частицей или определенной группы таких частиц, но ее размер будет установлен посредством фиксированного численного значения постоянной Авогадро, равной точно $6,022\,14X \times 10^{23}$ моль⁻¹.

Международный комитет мер и весов предлагает по-другому сформулировать существующие определения секунды, метра и канделы, сделав их абсолютно эквивалентными, и предлагаются следующие их формулировки :

- секунда, обозначение s , есть единица времени; ее размер устанавливается посредством фиксированного численного значения частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133, в состоянии покоя и при температуре 0 К, которая равна точно $9\,192\,631\,770$ и выражена единицей СИ s^{-1} , равной Гц;

- метр, обозначение m , есть единица длины; ее размер устанавливается посредством фиксированного численного значения скорости света в вакууме, равного точно $299\,792\,458$, при ее выражении единицей СИ $m \cdot s^{-1}$;

- кандела обозначение cd , есть единица силы света в данном направлении; ее размер установлен посредством фиксированного численного значения спек-

тральной силы светового потока монохроматического излучения частотой 540×10^{12} Гц, равной точно 683, при ее выражении единицей SI $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$ или $\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{Вт}^{-1}$, которая равна $\text{лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

Такие определения всех семи основных единиц будут естественным образом происходить из совокупности семи выше приведенных констант.

В резолюції ГКМВ не названо точну дату введення нових визначень, оскільки це буде залежати від стану справ з забезпеченням необхідних для цього умов.

Резолюція містить також звернення до усіх організацій та наукових закладів з метрології продовжити і посилити роботу з прискорення впровадження перевизначень і створення нової системи одиниць, названої New SI.

9.3 Аналіз запропонованих визначень основних одиниць

Не важко бачити, що в запропонованих визначеннях секунди, метра і кандели суттєвих змін не відбулось, вони залишились прив'язаними до тих же сталих, змінились лише формулювання.

Визначення ампера суттєво змінилось – зафіксована його простежуваність до елементарного заряду. Тим самим нове формулювання ампера вказує на методи його відтворення: опосередковано на основі квантових ефектів Джозефсона і Холла або ефекту одноелектронного тунелювання (див. п.п. 4.2, 4.7).

Суттєво змінюється також формулювання кельвіна – замість прив'язки його до потрійної точки води пропонується зв'язати його зі сталою Больцмана. Головна мета цього перевизначення - перейти від вимірювань за температурними шкалами до прямих вимірювань за допомогою «первинних термометрів». Слід зауважити, що перевизначення кельвіна викликає неоднозначну реакцію спеціалістів різних країн і залишається предметом дискусії.

На відміну від кельвіна, визначення моля через сталу Авогадро не викликає ніяких заперечень. Відзначається, що формулювання моля через N_A як числа часток в молі, зв'язує моль з її точним значенням $N_A = 6,0221415 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, не накладаючи будь-яких обмежень на кілограм, а також зберігає основне співвідношення між молярною масою речовини і масою структурних елементів, яка не має ніякого відношення до маси.

Найбільш суттєвим, безумовно, є запропоноване визначення кілограма, яке розглянемо більш докладно.

9.4 Про можливість створення природного еталона маси

Вище було сказано, що кілограм – єдина одиниця SI, що відтворюється за допомогою прототипу з усіма недоліками цього способу.

Тому вже багато років в національних метрологічних інститутах розвинених країн і в МБМВ ведуться роботи, метою котрих є прив'язка одиниці маси SI до стабільних фізичних ефектів, а через них – до фундаментальних фізичних сталих, тобто створення природного еталона кілограма.

Основними методами, які досліджувались, були:

- метод порівняння електричної і механічної потужності за допомогою так званих «ватт-вагів» з подальшим відтворенням одиниці маси через електричні величини;
- метод встановлення зв'язку між кілограмом і атомною масою якоїсь речовини (як правило, кремнію) за допомогою числа Авогадро;
- метод «левітуючої маси»;
- метод накопичення іонів золота.

З названих методів найбільш перспективними виявились перші два, які розглянемо більш докладно.

9.4.1 Метод ват-вагів

Процедура відтворення кілограма реалізується за допомогою комбінації чотирьох експериментів: відтворення вольт і ома на основі квантових ефектів Джозефсона і Холла відповідно, вимірювання прискорення вільного падіння і порівняння електричної потужності з механічною. Остання операція може бути виконана за допомогою ват-вагів, в розробці яких в останні роки досягнуто високих результатів (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Ват-ваги NIST

Маса в результаті цих експериментів може бути подана як функція двох джозефсонівських частот f_1 і f_2 , сталої Планка (елементарний заряд скорочується) і прискорення вільного падіння g в місці розташування ват-вагів.

Таким чином, цей метод ґрунтується на простежуваності до сталої Планка, а відтворений за його допомогою кілограм одержав назву «електричного».

Досягнута на сьогодні невизначеність відтворення кілограма цим методом оцінюється значенням $(7-8) \cdot 10^{-8}$, що свідчить про його перспективність.

9.4.2 Метод простежуваності до сталої Авогадро

У спрощеному вигляді цей метод можна подати таким чином.

Число Авогадро N_A – кількість атомів, яка міститься на 0,012 кг ізоотопу вуглецю ^{12}C . Якщо 0,012 кг містить N_A атомів, то в 1 кг повинно міститись X атомів, яке дорівнює

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

Тоді визначення кілограма через сталу Авогадро має вигляд:

варіант 1: кілограм – одиниця маси, яка дорівнює масі $1000 N_A / 12$ атомів вуглецю-12;

варіант 2: кілограм – одиниця маси, яка дорівнює масі $5,01845166 \cdot 10^{25}$ атомів вуглецю-12 в стані спокою і в основному квантовому стані.

Друге визначення встановлює точне значення сталої Авогадро $N_A = 6,0221415 \cdot 10^{23}$. Цей метод одержав назву «атомного кілограма».

Підкреслимо: при визначенні кілограма через значення маси якоїсь елементарної частинки, наприклад, атома вуглецю ^{12}C , електрона, протона, тощо, необхідно визначити число Авогадро з невизначеністю близько 10^{-8} . Для вирішення цієї задачі необхідно виготовити кристали кремнію надвисокої чистоти і близької до ідеальної структури. Кількість атомів підраховується за допомогою рентгеноструктурного аналізу (XRCD-метод). Для цього в рамках Європейського союзу було проведено проект SIMUS, в якому проводилось вирощування кристалів кремнію, його обробка у вигляді кулі, точне вимірювання його діаметру та інші прецизійні операції (рис. 9.2).



Рис. 9.2. Виготовлення кремнієвої кулі у Австралійському центрі прецизійної оптики

Молекулярну масу кремнію визначали за допомогою мас-спектрометра, міжатомну відстань – шляхом комбінованого використання рентгенівської і оп-

тичної інтерферометрії. За допомогою цих експериментів стала Авогадро була встановлена з невизначеністю близько $5 \cdot 10^{-8}$. В найближчі роки очікується її зниження до $(1-2) \cdot 10^{-8}$, що робить цей шлях перевизначення кілограма достатньо конкурентоспроможним.

При порівнянні двох розглянутих методів визначення кілограма: через h («електричного кілограма») і N_A («атомного кілограма») думки різняться. З одного боку, є підстава вважати, що розвиток техніки вимірювання мас елементарних часток (пастка Пеннінга), висока точність теоретичних розрахунків для вільних зв'язаних електронів ($\approx 10^{10}$) – роблять метод «атомного кілограма» більш переважним.

В той же час автори перевизначень однозначно схилиються до методу «електричного кілограма», який ґрунтується на фіксації сталої Планка. Аргументується це, головним чином, тим, що якщо фіксується e (для перевизначення ампера), то фіксація також h призведе до точних значень сталої Джозефсона $2e/h$ та сталої Клітцинга h/e^2 , що надзвичайно важливо для метрології в електриці.

Крім того, ураховується, що h є фундаментальною сталою, фіксація якої дуже важлива для квантової фізики [46].

На цей час рівень досягнутої точності і готовність апаратури до практичної реалізації кілограма недостатньо високі для того, щоб можна було прийняти нове визначення на 24 засіданні ГКМВ в 2011 році, де обговорювалось це питання. Тому, як показано вище, остаточне введення нових визначень перенесено на більш віддалений термін, можливо на 2015 рік (25 засідання ГКМВ).

9.5 Наслідки впровадження нової SI

Найважливішим наслідком нової системи буде, безумовно, позбавлення від останнього артефакту – прототипу кілограма і перехід на його природне визначення. Це позитивно вплине також на інші одиниці, пов'язані з кілограмом.

Очевидно позитивним 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 $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м і увійшла у визначення ампера, що забезпечило ідентичність електричних і механічних одиниць енергії та потужності. Якщо ж використовувати для визначення тесла та вольт 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

одинацями. 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, вольта, ома, 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.

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 вольта, ома здійснювати в національних еталонах на основі квантових ефектів із застосуванням єдиних для всіх країн значень ФФС, що устанавлюються КОДАТА. Ці одиниці одержали назву «практичних».

Таким чином, виник дуалізм у визначеннях електричних одиниць, який полягає в існуванні одиниць SI і практичних, які простежуються до ФФС. Суттєво, що цей дуалізм не обмежується вольт, ом і теслою, а розповсюджується як на основну одиницю – ампер, так і на інші електричні одиниці, оскільки всі вони спираються на квантові еталони.

Очевидно, що природним і логічним шляхом усунення цього дуалізму є 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. Слідом за ними одиницями SI становляться й інші електричні одиниці, тобто дуалізм повністю усувається.

9.6 Очікуваний вплив перевизначення основних одиниць на ФФС і науку в цілому

Як вже було сказано, при фіксації сталих h і e магнітна стала μ_0 , електрична стала ϵ_0 , а також характеристичний імпеданс вакууму $Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = \mu_0 c_0$, які в існуючій системі SI мають точні значення, стануть величинами, які визначаються експериментально. Виникає питання: що суттєвіше, які стали “краще”? В [46] з цього приводу віддається безумовна перевага тому факту, “що одиниці ФФС стають одиницями SI”, з чим важко не погодитися. Там же показано, що невизначеність μ_0 , ϵ_0 і Z_0 відносно раніше зафіксованих значень не перевищить $1 \cdot 10^{-9}$, що практично несуттєво.

У цій же роботі аналізується вплив фіксації h , e , k , N_A на інші ФФС і показано, що точні значення набувають також стала Дірака $h = \frac{h}{2\pi}$, квант магніт-

ного 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. Відзначається, що значним позитивним моментом фіксації h , e , k , N_A стане зниження невизначеності всіх інших сталих і зв'язку між ними, що має важливе значення для квантової фізики і науки в цілому.

9.5 Висновок

Як видно, з наведених вище матеріалів, прийняття нових визначень ряду основних одиниць стане революційним кроком у плані подальшого вдосконалення міжнародної системи одиниць. Відзначимо, що ці пропозиції знаходять, в основному, підтримку у світі, дискусію викликає лише окремі деталі і терміни введення нових визначень. Найбільш важливими наслідками пере визначення стануть:

- усунення останнього артефакту і створення природного еталона кілограма;
- подолання дуалізму у визначеннях електричних одиниць і “легітимне” використання квантових ефектів для безпосередньої реалізації цих одиниць;
- уточнення значень ряду ФФС, що суттєво для фізики і науки в цілому;
- створення передумов для переходу до цільної системи одиниць без поділу на основні і похідні.

Контрольні питання

1. Які основні одиниці системи SI припускається перевизначити?
2. Що є основою пере визначення одиниці маси?
3. Як ви розумієте терміни «артефакт» і «інваріант» стосовно до метрології?
4. Що є первинним еталоном одиниці маси на сьогодні?
5. Який принцип закладається в нові визначення ряду основних одиниць системи SI?
6. Який недолік має існуюче на цей час визначення одиниці термодинамічної температури?
7. Які особливості мають еталони, що ґрунтуються на квантових ефектах?
8. Які найважливіші наслідки пере визначення основних одиниць для метрології в галузі електроніки?
9. Які основні напрямки досліджень зі створення природного еталона кілограма ви можете назвати?
10. Значення яких фундаментальних сталих вважаються точно відомими при перевизначенні кілограма, ампера, кельвіна, моля?

ВИСНОВОК

У висновках по окремих главах були показані напрямки удосконалення еталонів у науково-технічному плані. Розглянемо також деякі організаційні аспекти розвитку еталонної бази і, зокрема, питання міжнародного співробітництва в цій області на сучасному етапі розвитку світового співтовариства.

Оглядаючись назад, відзначимо, що вже до середини XIX століття різкий підйом світової торгівлі і подальший розвиток науки і техніки привели до усвідомлення необхідності міжнародних угод в метрології. Результатом цього з'явилося підписання в 1875 р. Метричної конвенції, що стала першою офіційною міжнародною угодою, спрямованою на забезпечення єдності одиниць вимірювань і еталонів.

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

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

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

Якщо створення Метричної конвенції здійснювалося зверху, тобто завдяки міжурядовим переговорам, то необхідність у різних домовленостях в області калібрування і випробувань, що сприяють розвитку системи взаємного визнання, виникла в самій економіці [47, 14]. Вперше угода про взаємне визнання сертифікатів про калібрування була укладена між британською і німецькою калібрувальними службами. З цієї угоди почався усе більш активний рух у цій області, що привело до розробки документа "Угода про багатостороннє визнання національних еталонів і виданих національними метрологічними інститутами сертифікатів про калібрування" (MRA). У жовтні 1999 р. під час XXI Генеральної конференції з мірах та вагах 38 країн (у тому числі Росія) і 2 міжнародні організації підписали угоду про першу фазу, причому двері до його підписання залишилися відкритими і для інших країн. На кінець 2003 р. число учасників цієї угоди склало 59, включаючи Україну і Білорусь.

Одним з наріжних каменів цієї угоди є так звані "ключові звірення", для проведення яких створені особливі правила і визначення [48]. Уведені також додаткові звірення, що проводяться винятково на регіональному рівні.

Можна сказати, що глобалізація економіки і торгівлі привели до аналогічного явища й у метрології і, зокрема, у створенні і функціонуванні еталонів. Питання збереження еталонів з національної проблеми перетворилися у глобальну. Відбувається деякий зсув центра ваги еталонних робіт з кількісної в якіс-

ну сторону, у напрямку участі в міжнародних звіреннях, що вимагає ретельної підготовки, відпрацьовування методик і апаратури еталонів, глибокої експериментальної перевірки всіх метрологічних характеристик еталонів, гармонізації понять і процедур у даній сфері. Росія – активний учасник цього процесу, багато хто її еталони пройшли процедури міжнародних звірень і визнані у світі. Включилася в цей процес і Україна, створивши основи своєї національної еталонної бази (47 державних еталонів). Тому надзвичайно важливим напрямком розвитку еталонної бази є активна участь країн СНД у Євро-Азіатській організації державних метрологічних установ (КОOMET), згаданій Угоді про визнання (MRA), зокрема подання у МБМВ відомостей про свої калібрувальні і вимірювальні можливості, а також практична участь у звіреннях еталонів (ключових і регіональних).

Список літератури

1. Закон України №1765-IV “Про внесення змін до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»” від 15.06.04.
2. ДСТУ 3651.0–97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення.
3. ДСТУ 3651.1–97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Похідні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць та позасистемні одиниці. Основні положення, назви та позначення.
4. ДСТУ 3651.2–97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Фізичні сталі та характеристичні числа. Основні положення, позначення, назви та значення. – 12 с.
5. ДСТУ 2681–94. ДСВ. Метрологія. Терміни та визначення.
6. РМГ 29–99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 2000, – 46 с.
7. Проненко В.И., Якирин Р.В. Метрология в промышленности. – К.: Техника, 1979, – 223 с.
8. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): Учеб. пособие. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 336 с.
9. Цюцюра С.В., Цюцюра В.Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація: Навчальний посібник. – К.: Знання, 2006 – 242 с.
10. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки. – Харків: НТУ ХПІ, 2005. – 524 с.
11. Базакуца В.А., Сук О.П. Фізичні величини та їх одиниці. Навчальний посібник. – Харків: ХДПУ, 1988. – 308 с.
12. ГСССД 1–87. Фундаментальные физические константы.
13. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.
14. Кохзик М. Национальные метрологические институты на пути в новое тысячелетие // Український метрологічний журнал, - 2000. – вип. 3. – С. 5-9.
15. ДСТУ 3231:2007. Еталони одиниць вимірювань державні первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування.
16. ГОСТ 8.381-80 ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей. М.: Изд-во стандартов – 1981. – 9 с.
17. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
18. GUIDE 99. International vocabulary of metrology – Basic and general concept and associated terms (VIM)/ ISO/IEC 2007. – 90 p.
19. ДСТУ РМГ 43 : 2007. ГСИ. Применение “Руководства ИСО по выраже-

нию неопределенности измерений”, 2003 (РМГ 43: 2001, IDТ)/

20. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях. – Харьков: Консум, 2002, – 256 с.

21. ГОСТ 8.061–80. ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение. – М: Изд-во стандартов, 1986.– 8 с.

22. Завельский Ф.С. Время и его измерение. – М.: Наука, 1987. – 256 с.

23. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике /Под ред. В. К. Коробкова. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 296 с.

24. Клейман О.С., Оголюк В.П., Сидоренко Г.С., Соловйов В.С., Ткачук О.О. Державний первинний еталон одиниці часу і частоти// Український метрологічний журнал, 1997, – вип. 3. – С. 18-23.

25. Зимокосов Г.А., Мачехин Ю.П., Оголюк В.П., Соловьев В.С., Янушкевич Э.П. Государственный первичный эталон единицы длины// Український метрологічний журнал, 2001, – вип. 4. – С. 39-45.

26. Квантовая метрология и фундаментальные константы. Сборник статей. (Перевод с англ.). М: Изд-во “Мир”, 1981. – 368 с.

27. Назаренко Л.А., Белих В.В., Кисіль О.М., Ромоданов І.С., Сліпушенко В.П., Криворотенко О.Д., Сергієнко Р.П. Державний первинний еталон одиниці температури Кельвіна за випромінюванням в діапазоні 1357,77 – 2800 К// Український метрологічний журнал, 1995, – вип. 1. – С. 26-30.

28. Захаров И.П., Павленко Ю.Ф. Эталоны в области электрорадиоизмерений: Справочное пособие. М.: Горячая линия – Телеком. 2008 – 192 с.

29. Колозинская И.А., Красовский В.Д., Янушкевич Э.П. Некоторые вопросы измерения массы и силы.// Український метрологічний журнал, 2001 – вип. 3. – С. 29–33.

30. Purcell, Torrey, Paund // Phys. Rev. Mod. Phys. – 1946. – V.18. – P. 323.

31. Bloch, Hansen, Packard // Phys. Rev. – 1946. – V.69 – P. 127.

32. Josephson B.//Phys. Lett. – 1962. – V.1. – P. 251.

33. Klitzing K., Dorda G., Pepper M. New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V.45. – №6. – P. 494 – 497.

34. Popel R. The Josephson Effect and Voltage Standards// Metrologia – 1992. – V.29. P. 153 – 174.

35. Зингерман В.И. и др. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции// Український метрологічний журнал – 1996 – вип. 2,3. – С. 36 – 40.

36. Галахова О.П., Федоров А.М. Методы точных измерений силы тока, напряжения, мощности и их отношений в диапазоне звуковых и высоких частот. - М.: Машиностроение, 1976. – 128 с.

37. Кротков И.Н., Рождественская Т.Б., Федоров А.И., Фрумкин В.Д. Эталоны единиц электрических величин для широкого диапазона частот. – М.: Машиностроение, 1978. – 96 с.

38. Павленко Ю.Ф., Бєліков В.А., Клімашевський В.С. Державний первинний еталон одиниці електричної напруги змінного струму в діапазоні частот від

30 до 1000 МГц // Український метрологічний журнал – 2005 – вип. 1. – С. 32–39.

39. Катков А.С., Колтик Е.Д., Кржимовский В.И., Телитченко Г.П. Единый квантовый эталон вольты на постоянном и переменном токе. Концепция построения// Измерительная техника. – 1997. – №12. – С. 39 – 44.

40. Шапиро Е.З., Белов В.С. и др. Государственный специальный эталон единицы электрической мощности// Измерительная техника. – 1990. – №8. – С. 3 – 5.

41. Кротков И.Н. Точные измерения электрических емкости и индуктивности. – М.: Издательство стандартов, 1966. – 272 с.

42. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. - М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

43. Ахмадов О.А., Ахмадов С.О., Харжевсий Р.А., Сурду М.М. Державний еталон одиниць електричної ємності і тангенса кута втрат // Український метрологічний журнал – 2007 – вип. 3. – С. 24– 30.

44. Эталонная база России // Измерительная техника – 1999 – №10. – С. 3-8.

45. Болмусов Ю.Д. Павленко Ю.Ф., Соколовский Н.П. Метрологическое обеспечение измерителей модуляции. – М.: Военное издательство, 1992.– 192 с.

46. Миллс Я.М., Мор П.Дж., Квинн Т.Дж., Тейлор Б.Н., Уильямс Э.Р. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля: предполагаемый подход к применению Рекомендации 1 МКМВ (С1-2005) // Метрология. – 2007. -№2. – С. 5-57 (Mills J.M.e.a. // Metrologia. – 2006. V. 43. - №44. – P. 227).

47. ВІРМ: Le Systeme International d'Uniter 7 edition. – 1998.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень	3
ВСТУП	5
1 ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ	6
1.1 Про термін “єдність вимірювань”	6
1.2 Міжнародна система одиниць	6
1.3 Структура системи забезпечення єдності вимірювань.....	9
1.4 Нормативно-правова основа системи ЗЄВ	10
1.5 Організаційна основа забезпечення єдності вимірювань	11
1.6 Наукова основа забезпечення єдності вимірювань	12
1.7 Технічна основа системи забезпечення єдності вимірювань	13
1.7.1 Система державних еталонів.....	14
1.7.2 Стандартні зразки властивостей речовин та матеріалів.....	15
1.7.3 Сукупність робочих засобів вимірювальної техніки.....	16
1.7.4 Система передачі розміру одиниць	16
1.7.5 Стандартні довідкові дані про фізичні сталі та властивості речовин і матеріалів	17
1.8 Забезпечення єдності вимірювань у міжнародному масштабі.....	20
Контрольні питання	21
2 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПОБУДОВИ ЕТАЛОНІВ	22
2.1 Функції еталона	22
2.2 Класифікація еталона	22
2.3 Особливості еталонів в порівнянні з іншими засобами вимірювальної техніки	23
2.4 Нормовані метрологічні характеристики еталонів	24
2.4.1 Способи подання характеристик похибок первинного еталона	25
2.4.2 Способи подання характеристик похибок вторинних еталонів.....	25
2.5 Обчислення характеристик похибок еталонів.....	25
2.6 Обчислення характеристик невизначеності еталонів.....	27
2.7 Взаємне перерахування характеристик похибок і невизначеності вимірювань.....	30
2.7.1 Перерахування від характеристик похибки до оцінок невизначеності вимірювань.....	30
2.7.2 Перерахування від невизначеності до оцінок характеристик похибки вимірювань.....	31
2.8 Передача розмірів одиниць ФВ від еталонів робочим засобам вимірювальної техніки	31
2.8.1 Повірочні схеми	31
2.8.2 Методи вимірювань, що застосовуються при передаванні одиниці.....	33
Контрольні питання	34
3 ЕТАЛОНИ ОСНОВНИХ ОДИНИЦЬ SI	35
3.1 Секунда.....	35

3.2 Метр	41
3.3 Ампер	48
3.4 Еталон одиниці температури	50
3.5 Кандела	57
3.6 Кілограм	59
3.7 Моль	62
3.8 Висновок	62
Контрольні питання	62

4 СИСТЕМА ЕТАЛОНІВ В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОРАДІОВИМІРЮВАНЬ. КВАНТОВІ (БАЗОВІ) ЕТАЛОНИ СИСТЕМИ

4.1 Одиниці ФВ, що застосовуються в електрорадіовимірюваннях. Еволюція методології відтворення	63
4.2 Квантові ефекти та еталони електричних одиниць на їх основі	66
4.3 Система еталонів в області електрорадіовимірювань	67
4.4 Еталон вольт на ефекті Джозефсона.....	69
4.4.1 Фізична суть ефекту Джозефсона.....	69
4.4.2 Структурна схема еталона.....	71
4.5 Еталон ома на основі квантового ефекту Холла	77
4.5.1 Фізична суть ефекта Холла	77
4.5.2 Структурна схема еталона.....	79
4.5.3 Про можливості атестації мір опору за допомогою еталонної ємності.....	82
4.6 Еталон одиниці магнітної індукції на ефекті ядерного магнітного резонансу	84
4.7 Еталон ампера на основі квантових ефектів	88
4.8 Висновок	90
Контрольні питання	91

5 ЕТАЛОНИ ОДИНИЦЬ НАПРУГИ І СИЛИ ЗМІННОГО СТРУМУ

5.1 Еталони одиниці напруги змінного струму	92
5.1.1 Параметри змінної напруги	92
5.1.2 Основні методи точного вимірювання (відтворення) напруги змінного струму	93
5.1.3 Еталон змінної напруги в діапазоні низьких і середніх частот	95
5.1.4 Еталон одиниці напруги на високих частотах	100
5.2 Узгодження розміру вольт в частотному і динамічному діапазонах	108
5.2.1 Еталон високої напруги постійного та змінного струму	108
5.2.2 Узгодження еталонів вольт	109
5.3 Еталони одиниці сили змінного струму	110
5.3.1 Еталони сили струму в діапазоні низьких і середніх частот	111
5.3.2 Еталони сили струму в діапазоні високих частот	113
5.4 Узгодження розміру ампера в частотному і динамічному діапазонах	115
5.5 Висновки	116
Контрольні питання	117

6 ЕТАЛОНИ ПАРАМЕТРІВ ІНТЕНСИВНОСТІ	119
6.1 Еталони одиниці електричної потужності.....	119
6.1.1 Еталони потужності змінного струму на промисловій частоті.....	119
6.1.2 Еталони одиниці потужності електромагнітних коливань ВЧ- і НВЧ-діапазонів	124
6.2 Еталони одиниць напруженості електромагнітного поля.....	129
6.2.1 Загальні положення.....	129
6.2.2 Еталон напруженості електричного поля на частотах до 30 МГц.....	131
6.2.3 Еталон напруженості електричного поля в діапазоні вище 30 МГц	133
6.2.4 Еталон напруженості магнітного поля в діапазоні до 30 МГц.....	136
6.3 Еталон одиниці спектральної густини потужності шумового радіовипромінювання	138
6.4 Висновки	141
Контрольні питання	141
7 ЕТАЛОНИ ОДИНИЦЬ ПАРАМЕТРІВ ЛАНЦЮГІВ І ТРАКТІВ	142
7.1 Еталон одиниці електричної ємності	142
7.2 Еталон одиниці індуктивності	150
7.3 Еталони одиниці кута фазового зсуву між двома напругами	152
7.4 Поняття про еталони параметрів трактів з розподіленими постійними ...	154
7.5 Висновки	158
Контрольні питання	158
8 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ І РАДІОТЕХНІЧНИХ СИГНАЛІВ	159
8.1 Загальні відомості про вимірювання параметрів сигналів	159
8.2 Забезпечення єдності вимірювань нелінійних спотворень	160
8.2.1 Загальні відомості про спотворення сигналів. Нелінійні спотворення.....	160
8.2.2 Еталон одиниці коефіцієнта гармонік.....	163
8.3 Еталон одиниці коефіцієнта амплітудної модуляції	166
8.3.1 Параметри АМ-сигналу	166
8.3.2 Апаратурне рішення та характеристики еталона.....	168
8.4 Еталон одиниці девіації частоти частотно-модульованих коливань.....	171
8.4.1 Параметри сигналу з кутовою модуляцією	171
8.4.2 Апаратурне рішення та характеристики еталона.....	174
8.5 Метрологічне забезпечення вимірювальних генераторів	179
8.6 Про метрологічне забезпечення осцилографів, аналізаторів спектра та інших багатофункційних засобів вимірювань	181
8.7 Висновок.....	181
Контрольні питання	182
9 ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ	183
9.1 Перспективи вдосконалення системи одиниць SI	183
9.2 Про можливість створення природного еталона маси	187

9.3 Наслідки пере визначення одиниць для метрології в галузі електроніки і радіоелектроніки	188
9.4 Очікуваний вплив пере визначення основних одиниць на ФФС і науку в цілому	189
9.5 Висновок.....	190
Контрольні питання	190
Список літератури	192