

З М І С Т

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	3
ВСТУП	12
ГЛАВА 1. МЕТРОЛОГІЯ НА МЕЖІ ХІХ ТА ХХ СТОЛІТЬ	23
1.1 Розвиток теоретичної та фундаментальної метрології	23
1.2 Діяльність у рамках Метричної конвенції	34
1.3 Створення систем одиниць вимірювання	43
1.4 Розвиток метрології у країнах світу	54
1.5 Метрологічна діяльність у Російській імперії	65
1.6 Удосконалення та виробництво мір і засобів вимірювання	82
ГЛАВА 2. МЕТРОЛОГІЯ МІЖ ДВОМА СВІТОВИМИ ВІЙНАМИ	107
2.1 Розвиток фундаментальної метрології та удосконалення систем одиниць вимірювань	107
2.2 Розвиток метрології у країнах світу	120
2.3 Метрологічна діяльність у СРСР	138
2.4 Удосконалення та виробництво засобів вимірювальної техніки ..	160
ГЛАВА 3. РОЗВИТОК МЕТРОЛОГІЇ У СЕРЕДИНІ ХХ СТОЛІТТЯ	180
3.1 Діяльність у рамках Метричної конвенції	180
3.2 Фундаментальні метрологічні дослідження	206
3.3 Утворення і діяльність міжнародних організацій з питань метрології, організація і проведення наукових конференцій	212
3.4 Розвиток метрології в країнах світу	218
3.5 Метрологічна діяльність у СРСР	225
3.6 Удосконалення та виробництво засобів вимірювальної техніки ..	234
ГЛАВА 4. РОЗВИТОК МЕТРОЛОГІЇ У 1970–1980-Х РОКАХ	262
4.1 Діяльність у рамках Метричної конвенції	262
4.2. Фундаментальні метрологічні дослідження	279
4.3 Діяльність міжнародних і утворення регіональних організацій з питань метрології, організація і проведення наукових конференцій .	283
4.4 Розвиток метрології в країнах світу	291
4.5 Метрологічна діяльність у СРСР	297
4.6 Удосконалення та виробництво засобів вимірювальної техніки ..	305

ГЛАВА 5. РОЗВИТОК МЕТРОЛОГІЇ У 1990-Х РОКАХ	336
5.1 Діяльність у рамках Метричної конвенції	336
5.2 Діяльність міжнародних організацій з питань метрології, організація і проведення наукових конференцій	345
5.3. Створення і розвиток регіональних метрологічних організацій .	358
5.4 Розвиток метрології у країнах світу	377
5.5 Метрологічна діяльність в Україні	389
5.6 Удосконалення та виробництво засобів вимірювальної техніки ..	396
ГЛАВА 6. МЕТРОЛОГІЯ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ РОЗВИТКУ	412
6.1 Діяльність у рамках Метричної конвенції	412
6.2 Діяльність міжнародних організацій з питань метрології та угоди про співробітництво між ними	429
6.3 Діяльність регіональних організацій з питань метрології, проведення наукових конференцій	446
6.4 Сучасні фундаментальні метрологічні дослідження та розвиток метрології у країнах світу	465
6.5 Метрологічна діяльність в Україні	473
6.6 Удосконалення та виробництво засобів вимірювальної техніки ..	480
ЗАКІНЧЕННЯ	499
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	533

ВСТУП

“Будь-яка наука починається з вимірювань,
а метрологія – наука про вимірювання,
отже, метрологія – це наука всіх наук”.

Думка експерта

Термін “метрологія” у перекладі з грецької означає вчення про міри (від грец. μέτρον – міра, λόγος – вчення, лат. *métron* – міра, *logos* – слово, вчення) [1]. Сучасний *Міжнародний словник метрології* (VIM) [2] визначає поняття метрологія як *науку про вимірювання (science of measurement)* та її застосування. Метрологія включає всі теоретичні та практичні аспекти вимірювання, незалежно від невизначеності вимірювання та галузі його застосування. Згідно з VIM *вимірювання (measurement)* визначається як процес отримання експериментальним шляхом одного або більше значень величин, які обґрунтовано можна віднести до величини. Воно означає порівняння величин, включаючи обчислення об’єктів.

У науковій літературі теорія пізнання має назву *гносеологія* (від грец. γνῶσις – знання, пізнання і λόγος – вчення, наука). *Вимірювання* кількісно характеризують навколишній матеріальний світ, відкривають діючі в ньому закономірності, тому є інструментом пізнання. *Точність вимірювань*, з якою підтверджується будь-яка істинна наукова теорія, на кожному етапі розвитку науки є кінцевою. Разом з тим існує можливість підвищення цієї точності при удосконаленні вимірювальної техніки і вихід її на якісно новий рівень, що має не число технічний, а принциповий гносеологічний зміст. Метрологія відноситься до гносеології, а її вихідні поняття є елементами теорії пізнання.

Принципом вимірювань *фізичних величин* (ФВ) є фізичне явище або ефект, що лежить в основі вимірювань. При будь-якому вимірюванні відбувається порівняння невідомого розміру з відомим і вираження першого через другий у кратному чи частинному відношенні, тобто порівняння ФВ з її мірою, яка має органічну єдність якісної та кількісної визначеності фізичного об’єкта чи процесу [3–7].

Вимірювання, як експериментальний процес, є критерієм істинності теорії, але експериментатор вносить до процесу вимірювання елемент суб’єктивізму, який повинен бути зменшений. Видатні вчені *А. Енштейн* і *Л. Інфельд* зазначали [8], що фізичні поняття по суті вільні витвори людського розуму і неоднозначно визначені навколишнім світом, як це іноді може здаватися. У процесі пізнання саме практика є його основою і критерієм істини. Метрологія є теоретичною основою вимірювальної техніки, тобто поєднанням теорії з практичною діяльністю людини, яке дозволяє розкривати діючі у природі закономірності.

Відомий метролог *М. Ф. Маліков* писав [9], що вимірювання є найбільш адекватним відображенням числовими значеннями властивостей фізичних

об'єктів і явищ та неможливі без використання двох операцій – відтворення і порівняння. Відомий фізик *Б. М. Марков* писав [10], що якщо знайдена адекватна фізичним ідеям математична форма, то надалі математичний апарат в основному діє “автоматично” і дає кількісну “оцінку” критерію застосування того чи іншого макроскопічного поняття.

Прогрес техніки змінює предметну галузь виробничої діяльності людини, тому техніка є посередником між людиною та природою. *Інформаційна технологія* займає провідне місце у системі сучасних технологій та значно впливає на розвиток точних наук і техніки. Вимірювання мають виключно велике значення в діяльності суспільства, йому притаманні значні резерви, використання яких є однією з вирішальних умов здійснення наукового і технічного прогресу.

Сучасне природознавство має справу з динамічною реальністю, яка розширюється і змінюється із ростом і зміною нашого її розуміння. Класична фізика допускає можливість похибок чи невизначеностей у вимірюваннях і для їхньої корекції використовує методи математичної статистики і теорії вірогідності. У квантовій механіці немає можливості підвищити роздільну здатність *засобів вимірювання* (ЗВ) і наші уявлення про явища формуються тільки на основі статистичних даних. Тому можна констатувати, що математичними знаннями вичерпуються всі наші знання відносно різних аспектів реальності.

Розробник кварцових і атомних годинників англійський фізик-експериментатор *Е. Л'юїс* був одним з найвідоміших співробітників Національної фізичної лабораторії Великої Британії (NPL). Він зазначав [11], що границя між математичним і емпіричним знанням не абсолютна, тому постійно вносяться корективи у спостереження світу і в той же час видозмінюються наші теорії так, щоб вони відповідали новим спостереженням і експериментальним результатам.

Об'єктом *сучасної метрології* є всі встановлені одиниці вимірювання ФВ (механічних, електричних, теплових, оптичних тощо) і відповідні *засоби вимірювальної техніки* (ЗВТ). Метрологія спирається на досягнення різних природничих наук (зокрема, фізики, математики тощо), на їхні методи і засоби, що, у свою чергу, сприяє розвитку деяких з них. Тому крім звичайного визначення метрології як науки про вимірювання раніше існувало також визначення як “частина технічної фізики” [9].

Однак, сучасна метрологія відрізняється від інших природничих наук (математики, фізики тощо) тим, що її фундаментальні положення приймаються за угодами, а не диктуються об'єктивними закономірностями [4–7]. Це підкреслює наявність так званої *законодавчої метрології* (ЗМ, *legal metrology*) – частини метрології, що містить положення, правила, вимоги та норми, які регламентуються і контролюються державою для забезпечення єдності вимірювань. Згідно із *Міжнародним словником термінів із ЗМ* (VIML) Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML) [12] ЗМ є розділом метрології, який охоплює здійснювані компетентними органами ви-

ди діяльності, що зумовлені нормативними вимогами і стосуються вимірювання, одиниць вимірювань, ЗВТ і методів вимірювання.

Розрізняють також і так звані *теоретичну метрологію* (іноді застосовують термін “*фундаментальна метрологія*”) – розділ метрології, предметом якого є розробка фундаментальних основ метрології та *прикладну метрологію* – розділ метрології, предметом якого є питання практичного застосування розробок теоретичної метрології та положень ЗМ [4–7].

Метрологія є *теоретичною основою вимірювальної техніки*, одного з основних факторів технічного прогресу в усіх галузях діяльності людини. Розвиток метрології знаходить відображення в першу чергу в удосконаленні теоретичних основ вимірювань, узагальненні практичного досвіду в галузі вимірювань і визначає напрямки вдосконалення вимірювальної техніки. Рівень вимірювальної техніки у значній мірі визначає загальний рівень розвитку науки і техніки. Досягнення вимірювальної техніки, насамперед стосовно точності та достовірності вимірювання ФВ чи параметрів фізичних процесів, дозволяють виявляти нові явища і закономірності та уточнювати уже відомі.

Історія метрології тісно пов’язана із суспільно-політичними науками, так як вивчає процес розвитку метрологічних знань у зв’язку з історією людства, розвитком матеріальної культури та контактів між народами, а розвиток систем одиниць вимірювання обумовлений ростом виробничих сил і сприяє розширенню міжнародних зв’язків. При дослідженні розвитку метрології необхідно також використовувати здобутки і методи інших історичних наук, зокрема, *історії цивілізації та економіки* [13–18], *історії науки і техніки* [19–21], *історії фізики* [22–28] тощо.

Всесвітня історія, природно, залежить від взаємодії не лише національних впливів, а таких, які виникають унаслідок більш загальних причин. За визначенням відомого англійського історика *А. Дж. Тойнбі* [29, 30] суспільство, яке включає в себе чимало спільнот того ж самого типу, реально виступає “*самодостатнім полем історичного дослідження*”. Таким полем не може бути ані національна держава, ані людство в цілому і ним, певно, буде угруповання, яке можна назвати суспільством. Більш загальні причини і визначають розвиток подій у кожній окремо взятій країні, але їх вірне висвітлення можливе лише при вивченні їх в окремих проявах і не беручи до уваги, як вони взаємодіють у межах усього суспільства.

Всяке наукове історичне дослідження, як слушно зазначає історик фізичної науки *Я. Г. Дорфман* [31], містить такі основні етапи: *фактологічний* – збір, перевірка і систематизація фактів; *аналітичний* – вивчення взаємозв’язку між фактами і з’ясування причин, що впливають на них; *синтетичний* – узагальнення результатів і виявленні основних законів цієї науки. Більшість досліджень з історії метрології переважно обмежуються фактологічною стороною та існують лише окремі нечисленні та найчастіше однобічні спроби аналізу причин, що впливали на історичні факти.

Для *систематичного дослідження* історичного розвитку певної науки в минулому доцільно виходити з нині існуючої її внутрішньої структури, тобто з виявлення його окремих частин, щоб простежити поступовий розвиток ко-

жної з них, еволюцію їхньої взаємодії та їхнього сполучення між собою. Структура кожної окремої науки повинна відбивати специфіку цієї науки на визначеному етапі її розвитку, тому варто очікувати, що вона повинна змінюватися, відбиваючи в тому чи іншому ступені еволюцію самої науки [31].

Історія метрології утворює самостійний елемент структури метрології, що поєднує всі її частини на основі їхнього взаємного генетичного зв'язку та історичної послідовності виникнення. З економічним розвитком країн, зростом місцевої та міжнародної торгівлі, виникла необхідність у проведенні спеціальних метрологічних досліджень. Тому для історичних досліджень метрології важливо всебічне висвітлення таких складових розвитку метрології як *теоретична (фундаментальна), законодавча і прикладна*.

Метрологія допомагає вивченню джерел, особливо джерел з соціально-економічної історії, у роботі над найважливішими історичними джерелами, що розкривають економічну історію і дозволяє зрозуміти і витлумачувати їх. Метрологія, як і інші допоміжні історичні дисципліни, збагачує історію новими фактичними даними, а питання стану одиниць вимірювання, точності їх еталонів у певні історичні періоди визначається рівнем розвитку наукових знань і суспільства в цілому [32, 33].

Однієї із найзначніших подій у метрології та певним її рубіконом стало підписання у 1875 р. міжнародної *Метричної конвенції (The Convention of the Metre)*. Її підписання стало подією світового значення для суспільно-політичного, економічного і технічного розвитку всього людства, а не лише для метрології. Згідно Метричної конвенції був утворений Міжнародний комітет з мір і ваг (СІРМ) і створена постійно діюча *міжнародна метрологічна установа* – Міжнародне бюро з мір і ваг (ВІРМ). ВІРМ своєю діяльністю стимулювала бурхливий процес створення спеціальних наукових і практичних метрологічних установ, а також широке розгортання метрологічних робіт на національному рівні. Саме з цих пір почався розвиток метрології саме як науки про вимірювання [34–37].

В кін. ХІХ – на поч. ХХ ст. відбувся бурний розвиток науки, який охопив потім техніку і технологію, що пов'язують із так званою *другою науково-технічною революцією*. Інтенсивний розвиток науки і промисловості привів до необхідності розширення міжнародних торговельних зв'язків. Це стало основним стимулом для прогресивного розвитку метрології як науки і постановку як основної її проблеми створення єдиної міжнародної системи одиниць для всіх галузей вимірювань. Практичні потреби сприяли здійсненню заходів з усунення різноманіття національних систем одиниць і застосовуваних позасистемних одиниць.

Була заснована Міжнародна електротехнічна комісія (ІЕС) за результатами Міжнародного конгресу з електрики. Її призначенням стало універсалізація термінології в галузі виробництва електричних машин і стандартизацією їхніх параметрів [38, 39]. Впровадження у життя положень Метричної конвенції стало настільки суттєвим, що тепер навіть не можна уявити без неї проведення наукових і метрологічних досліджень. Використання у метрологічних і наукових колах прийнятих на її основі *міжнародних одиниць вимі-*

рювань, реалізованих у міжнародних і національних еталонах, стало буденною справою. Важливе також запровадження Метричною конвенцією десятикового поділу кратних і частинних одиниць ФВ, що більш звично і зручно для людства.

Великий внесок у розвиток фундаментальної метрології в кін. ХІХ – на поч. ХХ ст. внесли всесвітньо відомі вчені *У. Томсон, Дж. Максвелл, Д. Джоуль, Е. Сіменс, Г. Гельмгольц, М. Планк, Л. Больцман, А. Майкельсон, Д. Менделєєв, В. Рентген, А. Беккерель* та багато інших вчених [21, 26, 27, 40–44]. У створення і розвиток національної метрологічної установи Німеччини великий внесок зробили *Е. Сіменс, Г. Гельмгольц* [45, 46], а російської Головної Палати мір і ваг (ГПМВ) – *Д. Менделєєв* [40–42]. Дослідженню метрології цього періоду у Російській імперії присвячені праці *М. Н Младенцева*, 1907 р. [47], *О. І. Каменцевої* разом з *М. В. Устюговим*, 1965 р. [48] і 1975 р. [31], *М. А. Шостьїна*, 1975 р. [49]. Дослідженню американської метрології присвячені праці *Л. Фішера*, 1925 р. [50], *Л. Гудсона*, 1963 р. [51]. В історію розвитку засобів вимірювання часу внесок зробили *В. Піуніров*, 1982 р. [52], *Д. Хаус*, 1982 р. [53], *Г. Вітроу*, 1988 р. [54], *Л. Хренов і І. Голуб*, 1989 р. [55].

Поч. – сер. ХХ ст. у загальній світовій історії є періодом, який з одного боку, характеризується становленням і активним розвитком системи державного регулювання капіталізму, а з іншого є періодом двох світових воєн. У цей період відбувалось скорочення ліберального режиму ринкових відношень, які господарювали у більшості розвинених на той час країнах, на основі значного підсилення втручання держави у економічні відносини. Розвитку метрологічної служби (МС) у СРСР присвячені праці групи авторів, 1945 [56] і МС в Україні – *В. Кандиби*, 1969 р. [57].

У післявоєнний період сер. ХХ ст. у Західній Європі міждержавні зв'язки починають переростати у міжнародну економічну інтеграцію. Ця інтеграція є процесом господарсько-політичного об'єднання країн на основі розвитку глибоких стійких взаємозв'язків і розподілу праці між національними господарствами, взаємодії їх відтворюваних структур на різних рівнях і у різних формах. Розвивалась також економічна інтеграція у Латинській Америці. З метою сприяння розвитку стандартизації та суміжних видів діяльності у світі з метою забезпечення міжнародного обміну товарами і послугами, а також розвитку співробітництва в інтелектуальній, науково-технічній і економічній галузях була створена Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) [38, 39].

Представниками низки країн було підписано Конвенцію про заснування ОІМЛ, яка мала на меті розв'язання в міжнародному плані технічних і адміністративних проблем, що виникають у зв'язку з використанням вимірювальних приладів у сфері ЗМ. Згідно Конвенції ОІМЛ були утворені Міжнародний комітет ЗМ (СІМЛ) і Міжнародне бюро ЗМ (ВІМЛ). Історію розвитку цієї організації подано у праці *Б. Атана* [58]. Заснована також Міжнародна конфедерація вимірювань (ІМЕКО) – неурядова федерація з організацій-членів, які індивідуально займаються розвитком вимірювальних технологій. Її основними цілями стало сприяння міжнародному обміну науково-технічною ін-

формацією у галузі вимірювань та приладобудування і посилення міжнародної співпраці між науковцями та інженерами з досліджень та промисловості [38].

У 1960 р. відбулась суттєва подія у світовій метрології – прийнята нова система одиниць вимірювання, якій була надана назва “*Міжнародна система одиниць*” (*International System of Units, SI*). Її прийняття стало підсумком великої підготовчої роботи, виконаної низкою міжнародних і національних метрологічних організацій і закладів з уніфікації та уточнення одиниць ФВ. Несумнівною перевагою цієї системи одиниць забезпечили її швидке міжнародне визнання і широке розповсюдження. SI вважається найбільш досконалою і універсальною по зрівнянню з попередніми до неї. Її створення було стимулом для країн, які ще не перейшли на метричну систему і, таким чином виникла можливість уніфікувати одиниці, які застосовуються в міжнародних рекомендаціях і стандартах [59–67].

Створений Міжнародний комітет чисельних даних для науки і техніки (CODATA) як міждисциплінарний комітет Міжнародної ради наук (ICSU). Робоча група з *фундаментальних фізичних сталей* (ФФС) CODATA має на меті періодичне надання міжнародним науковим і технологічним співтовариствам міжнародно визнаного набору значень основних *фізичних сталей* (ФС) для використання у всьому світі. Число практично використовуваних у метрології ФФС відносно невелике [68], але без знання їхніх точних значень успішне створення зазначених еталонів неможливе. Тому проводяться періодичні погодження значень ФФС [69–76].

Стала актуальною потреба створення системи взаємозв’язаних еталонів на основі використання стабільних фізичних явищ [77–80]. Для створення еталонів почали використовуватися ФФС, зокрема квантовий ефект Холла і ефект Джозефсона [81–85]. Еталони на цих ефектах почали створюватися не лише для найвищого рівня метрологічних робіт, а і для широковживаних прецизійних еталонів. Здійснювалися також широкі дослідження ефекту одноелектронного тунелювання.

У др. пол. – кін. ХХ ст. найбільш широко знайшли застосування математичні методи для розвитку теорії похибок вимірювання, яка вважалась основою метрології. Застосування формалізованих математичних понять часто проводилось без поєднання їх з реальними фізичними властивостями матеріальних об’єктів, що приводило до отримання дуже далеких від реальності результатів. Тоді серед метрологів проходила жвава дискусія щодо *фундаментальних понять метрології* [86–91].

Міжнародні організації, які займаються питаннями метрології, стандартизації, теоретичної та практичної фізики, теоретичної та прикладної хімії такі як ВІРМ, ОІМЛ, ІЕС, ІСО, Міжнародний союз чистої й прикладної фізики (ІУРАР), Міжнародний союз чистої й прикладної хімії (ІУРАС), Міжнародна федерація клінічної хімії (ІФСС), Міжнародний форум з акредитації (ІФА), Міжнародне співробітництво з акредитації лабораторій (ІЛАС), почали пошуки нових нетрадиційних підходів до похибок засобів вимірювання та їх нормування для практичних метрологічних робіт. Результатами їх спільної

роботи стали спеціальна *Настанова для вираження невизначеності при вимірюванні* (*Guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM*) [92] та словник VIM [2].

Сучасна міжнародна торгівля визначає глобальну економіку, наукові, технологічні та медичні дослідження залежать від *міжнародного співробітництва*. Метрологія є однією з небагатьох галузей, де раціональним є високий ступінь координації. Узгодженість концепцій ЗМ, її вимог і процедур є тривалим процесом. Враховуючи мету, окреслену Генеральною угодою з бар'єрів у торгівлі (ГАТТ) [93] та іншими пов'язаними міжнародними угодами щодо усунення торговельних бар'єрів, особливо з технічних причин – *технічних бар'єрів у торгівлі* (ТБТ), стає необхідним прискорення досягнення такої узгодженості.

Так як вимірювання створюють фундамент для багатьох видів діяльності, тому численні міжнародні та регіональні організації займаються питаннями встановлення і стандартизації метрологічних вимог. Ці організації визначають і проводять у життя основні концепції політики гармонізації в галузі метрології, кожна з яких відповідає за свою ланку гармонізації нормативних і методичних документів. Загалом в багатьох країнах існує тенденція покращення економічної кооперації у рамках суміжних регіональних організацій [6, 7, 38, 39, 94, 95].

Продовжувала поглиблюватись *регіональна економічна інтеграція* країн. У Європі низка західноєвропейських країн підписали Римську угоду і заснували Європейське економічне співтовариство (ЕЕС), декілька європейських країн підписали Стокгольмську конвенцію і заснували Європейську асоціацію вільної торгівлі (ЕФТА). Пізніше вступила в силу Маастрихтська угода про утворення Європейського політичного, економічного і валютного союзу – Європейського союзу (ЕУ).

У Америці заснували Організацію Американських держав (ОАС), Північноамериканську асоціацію вільної торгівлі (НАФТА), Латиноамериканську асоціацію вільної торгівлі (ЛАФТ), реорганізовану в Латиноамериканську асоціацію інтеграції (АЛАІ). У Азії були утворені Азійсько-Тихоокеанське економічне співробітництво (АРЕС), Асоціація держав Південно-Східної Азії (АСЕАН), а арабські країни утворили Рада співробітництва арабських держав Перської затоки (GCC). У Африці було створене Південноафриканське співробітництво з розвитку (SADC).

У рамках регіональних економічних союзів почали створюватися регіональні метрологічні організації (РМО) з питань законодавчої, прикладної та фундаментальної метрології. У Європі створене Європейське співтовариство в галузі еталонів (EURAMET), Європейське співробітництво в галузі законодавчої метрології (WELMEC) і Організація співробітництва державних метрологічних закладів країн Центральної та Східної Європи (КООМЕТ, СООМЕТ) [94, 95]. Діють також Європейське співтовариство з акредитації (ЕА) і організації, які, зокрема, займаються питаннями стандартизації вимог до ЗВТ: Європейський комітет стандартизації (CEN) і Європейський комітет стандартизації в електротехніці (CENELEC) [37, 38].