

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

Конспект лекцій з дисципліни
**МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ,
СЕРТИФІКАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ**
для студентів за напрямом
172—Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

2025р

ЗМІСТ

Лекція 1 Метрологія як наука: історичні корені, предмет та сучасне значення.	3
Лекція 2 Системи одиниць фізичних величин: еволюція, класифікація, організація.	9
Лекція 3 Міжнародна система одиниць SI: структура, сучасний стан, перспективи розвитку.	16
Лекція 4 Вимірювання фізичних величин: поняття, класифікація та методи.	22
Лекція 5 Засоби вимірювальної техніки: структура, класифікація та типи	26
Лекція 6 Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки	30
Лекція 7 Похибки вимірювань: загальні положення, класифікація та характеристика результатів вимірювань.	35
Лекція 8 Ймовірнісна оцінка результатів вимірювань: статистичні методи та розподіли ймовірностей.	39
Лекція 9 Ймовірнісна оцінка похибок вимірювань та невизначеність результатів вимірювань.	43
Лекція 10 Стандартизація: історичні корені, теоретичні основи та принципи.	49
Лекція 11 Національна система стандартизації України: структура, документи та організація робіт.	53
Лекція 12 Сертифікація: сутність, історичний розвиток та сучасні системи.	57
Лекція 13 Управління якістю та кваліметрія: теоретичні основи, методи та перспективи розвитку.	61

Лекція 1

Метрологія як наука: історичні корені, предмет та сучасне значення

Метрологія як система знань про вимірювання має глибокі історичні корені, що сягають епохи зародження людської цивілізації, коли первісні суспільства вперше зіткнулися з необхідністю кількісної оцінки навколишнього світу для забезпечення базових потреб - розподілу їжі, визначення відстаней під час міграцій, обміну товарами та організації колективної праці; саме в цей період виникають перші примітивні міри, що базувалися на антропометричних характеристиках людини - крок, лікоть, долоня, палець, - які, хоча й були дуже умовними та суб'єктивними, створювали певну основу для взаєморозуміння в межах племені чи роду, а з появою землеробства та ремесел виникла нагальна потреба у більш універсальних стандартах, що призвело до появи перших фізичних еталонів у вигляді каменів певної маси або паличок певної довжини, які зберігалися в храмах або у вождів як символ влади та справедливості, оскільки контроль над мірами означав контроль над економічними процесами в суспільстві. Розвиток торгівлі між племенами та пізніше між державами став потужним каталізатором удосконалення метрологічних систем, адже відсутність єдиних мір призводила до конфліктів, шахрайства та перешкоджала економічному зростанню, тому вже в Стародавньому Єгипті, Месопотамії, Індії та Китаї існували державні органи, відповідальні за зберігання та перевірку мір, а фараони Єгипту щорічно після розливу Нілу відновлювали межі земельних ділянок за допомогою спеціальних вимірювальних інструментів, що свідчить про високий рівень розвитку практичної метрології вже чотири тисячоліття тому, хоча теоретичне узагальнення цих знань ще не існувало як окрема наука, а було розподілене між ремеслами, будівельною справою та торгівлею.

З появою античної цивілізації метрологія починає трансформуватися з суто практичного інструменту в елемент філософського та наукового пізнання світу, оскільки давньогрецькі мислителі, такі як Піфагор, Платон та Арістотель, розглядали кількісні відношення як основу гармонії Всесвіту, а Архімед у своїх працях «Про рівновагу площин» та «Про плаваючі тіла» вперше застосував

математичний апарат для опису фізичних явищ, що стало передумовою для формування поняття точної величини; саме в епоху еллінізму виникають перші спроби створення універсальних систем мір, які могли б бути застосовані в усіх частинах держави, що особливо було актуально для імперій Олександра Македонського та Римської імперії, де різноманіття місцевих мір ускладнювало управління та збір податків. Римляни, будучи практичними інженерами, створили досить розвинену систему лінійних мір (пес - римська нога, поділена на 12 унцій), мір об'єму для рідин та сипких тіл, а також мір маси, які широко використовувалися при будівництві доріг, акведуків та фортифікаційних споруд, проте навіть у рамках однієї імперії існували регіональні варіації цих мір, що свідчить про відсутність дійсно єдиної метрологічної системи; після падіння Римської імперії Європа занурилася в епоху, коли метрологія розвивалася переважно в рамках окремих феодалних володінь, де кожен сеньйор міг встановлювати власні міри, що призводило до хаосу в торгівлі та стало однією з причин економічної відсталості середньовічної Європи порівняно з ісламським світом, де, навпаки, завдяки працям аль-Хорезмі, аль-Біруні та інших учених існувала відносно уніфікована система мір, що базувалася на ісламських канонах та сприяла розвитку науки та міжнародної торгівлі на території від Іспанії до Індії, а в Китаї ще за часів династії Хань існувала державна система мір, яка регулярно перевірялася та уніфікувалася центральною владою.

Наукова революція XVII–XVIII століть стала переломним моментом у розвитку метрології, коли вимірювання перестали бути лише допоміжним інструментом ремесла чи торгівлі й перетворилися на фундаментальний метод наукового пізнання природи; Галілео Галілей у своїх дослідженнях з механіки вперше систематично застосував кількісні вимірювання для перевірки гіпотез, започаткувавши традицію експериментальної науки, де теоретичні положення повинні були підтверджуватися точними вимірами; Ісаак Ньютон у «Математичних началах натуральної філософії» (1687) визначив фундаментальні поняття маси, сили та прискорення через кількісні співвідношення, що вимагало уніфікації відповідних одиниць вимірювання; Антуан Лавуазьє, батько сучасної хімії, запровадив точне зважування речовин у хімічних реакціях, що дозволило сформулювати закон збереження маси та закласти основи кількісного хімічного

аналізу. У цей період виникає усвідомлення того, що прогрес науки та техніки неможливий без єдиних, точно визначених і відтворюваних одиниць вимірювання, а хаос місцевих мір стає серйозною перешкодою для розвитку міжнародної торгівлі та наукового співробітництва; у Франції наприкінці XVIII століття, під впливом ідей Просвітництва та потреб революційних перетворень, виникає ідея створення раціональної, універсальної системи мір, яка базувалася б не на довільних антропометричних величинах, а на незмінних характеристиках природи — саме це призвело до метричної реформи 1790-х років, коли Національні збори Франції прийняли рішення про створення нової системи мір, а в 1799 році були виготовлені перші еталони метра та кілограма з платини, які стали основою для подальшого поширення метричної системи спочатку в Європі, а згодом і у всьому світі.

Метрична реформа кінця XVIII століття у Франції стала історичною подією, що заклала основи сучасної метрології як універсальної науки; ідея створення системи мір, яка була б доступна кожній людині, незалежно від її походження чи місця проживання, базувалася на використанні природних констант - метр був визначений як одна сорокамільйонна частина довжини земного меридіана, що проходить через Париж, а кілограм - як маса одного кубічного дециметра води за температури танення льоду; такий підхід мав на меті забезпечити об'єктивність та відтворюваність одиниць без залежності від будь-яких довільних еталонів, хоча на практиці для повсякденного використання довелося створити фізичні еталони - платинові бруски, які зберігалися в Національному архіві Франції. У 1875 році була підписана Метрична конвенція, до якої увійшли 17 країн, що створила постійний міжнародний орган - Генеральну конференцію з мір і ваг (CGPM), яка координувала подальший розвиток метричної системи та забезпечувала уніфікацію одиниць на глобальному рівні; ця конвенція стала першим міжнародним договором, спрямованим на наукову та технічну співпрацю, і заклала основи сучасної міжнародної метрологічної інфраструктури, включаючи створення Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM) у Севрі поблизу Парижа, де зберігалися міжнародні еталони та проводилися порівняльні вимірювання для забезпечення єдності мір у різних країнах. Важливо зазначити, що метрична система поступово

впроваджувалася в різних країнах протягом XIX–XX століть, часто зустрічаючи опір з боку консервативних сил, але її переваги у сфері науки, промисловості та міжнародної торгівлі зрештою призвели до того, що сьогодні вона є фактично єдиною системою мір, прийнятою в усьому світі за винятком деяких країн, які частково зберігають традиційні одиниці в повсякденному вжитку.

Предмет метрології як науки формується навколо двох фундаментальних понять - єдності та точності вимірювань, які є невід'ємними умовами для забезпечення достовірності будь-яких кількісних даних; єдність вимірювань означає, що результати вимірювань, отримані в будь-якому місці світу, в будь-який час і будь-яким методом, можуть бути порівняні між собою з відомою точністю, що досягається завдяки використанню універсальних одиниць, відтворюваних за допомогою еталонів вищого рівня, а точність вимірювань характеризує ступінь наближення результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини, яка оцінюється через аналіз похибок та невизначеності вимірювань. Сучасна метрологія виходить за межі простої стандартизації одиниць і охоплює комплекс питань, пов'язаних з теорією вимірювань, розробкою методів та засобів вимірювальної техніки, забезпеченням прослідковуваності вимірювань до міжнародних еталонів, оцінкою невизначеності результатів та гармонізацією метрологічних вимог на міжнародному рівні; вона є наукою міждисциплінарною, оскільки її принципи застосовуються в усіх галузях знань, де виникає потреба у кількісній оцінці явищ — від фундаментальної фізики до медицини, від екології до економіки. Предмет метрології постійно розширюється разом із розвитком науки та технологій - сьогодні вона включає не лише традиційні фізичні величини (довжина, маса, час), а й складні біологічні, хімічні та інформаційні величини, а також займається проблемами вимірювання в умовах квантових технологій, наномасштабів та цифрових систем, де класичні підходи потребують суттєвої модифікації.

Сучасна метрологія структурно поділяється на три взаємопов'язані складові, кожна з яких відіграє особливу роль у забезпеченні єдності вимірювань у різних сферах суспільного життя; наукова метрологія є фундаментом усієї системи і займається розробкою нових методів вимірювань, створенням первинних еталонів, визначенням фундаментальних констант та вдосконаленням

міжнародної системи одиниць, ця сфера представлена провідними національними метрологічними інститутами (НМІ), такими як Національний інститут стандартів і технологій (NIST) у США, Національна фізична лабораторія (NPL) у Великій Британії або Державний науково-дослідний інститут метрології імені Д.І. Менделєєва (ВНДІМ) в Росії, які забезпечують наукову базу для всієї метрологічної інфраструктури країни. Прикладна або промислова метрологія зосереджена на практичному застосуванні метрологічних принципів у виробництві, торгівлі, охороні здоров'я та інших сферах, де від точності вимірювань залежить якість продукції, безпека споживачів та ефективність технологічних процесів; вона включає калібрування вимірювальних приладів, атестацію методик вимірювань, метрологічний нагляд на підприємствах та забезпечення прослідковуваності вимірювань до еталонів вищого рівня через ланцюг калібрувань. Законодавча або легальна метрологія регулюється державою і має на меті захист інтересів суспільства шляхом забезпечення точності вимірювань у сферах, що підлягають державному регулюванню - торгівлі товарами на вагу чи об'єм, таксометрах, лічильниках комунальних послуг, медичних приладах, приладах обліку пального на АЗС тощо; вона встановлює обов'язкові вимоги до засобів вимірювальної техніки, порядок їх затвердження типу, повірки та метрологічного нагляду, а також передбачає санкції за порушення метрологічного законодавства, що робить її важливим інструментом захисту прав споживачів та забезпечення чесної конкуренції на ринку.

Значення метрології для сучасного суспільства важко переоцінити, оскільки вона є невидимим, але фундаментальним елементом інфраструктури, який забезпечує функціонування практично всіх сфер життєдіяльності; у сфері торгівлі та економіки метрологія гарантує справедливість угод, оскільки від точності вимірювання маси, об'єму чи енергії залежить вартість товарів і послуг, а відсутність єдиних мір призвела б до хаосу на міжнародних ринках і неможливості здійснення трансграничної торгівлі. У медицині та охороні здоров'я точність вимірювань є питанням життя і смерті — від правильності дозування ліків, результатів діагностичних аналізів, показників медичного обладнання залежить ефективність лікування та безпека пацієнтів, тому метрологічне забезпечення медичних вимірювань є однією з найважливіших

сфер застосування метрології. У галузі екології та охорони навколишнього середовища метрологія забезпечує достовірність даних про забруднення повітря, води та ґрунтів, що є основою для прийняття управлінських рішень щодо захисту довкілля та контролю за дотриманням екологічних норм промисловими підприємствами. У науці та фундаментальних дослідженнях метрологія є основою експериментального методу - без точної кількісної оцінки явищ неможливе підтвердження або спростування наукових гіпотез, а сучасні досягнення у фізиці елементарних частинок, астрофізиці чи нанотехнологіях були б неможливі без розвитку надточних методів вимірювань. Нарешті, у сфері національної безпеки та оборони метрологія забезпечує точність навігаційних систем, засобів зв'язку, вимірювальних приладів у військовій техніці, а також є основою для верифікації міжнародних угод щодо контролю над озброєннями; таким чином, метрологія є не лише технічною дисципліною, а й важливим соціальним інститутом, який сприяє довірі між людьми, організаціями та державами через забезпечення об'єктивності та порівнянності кількісної інформації в глобалізованому світі.

Лекція 2

Системи одиниць фізичних величин: еволюція, класифікація, організація

Поняття системи одиниць фізичних величин забезпечує логічну організацію різноманітних кількісних характеристик природних явищ у єдину цілісну структуру, де кожна величина має чітко визначену одиницю вимірювання, пов'язану з іншими одиницями через фізичні закони та математичні співвідношення; система одиниць представляє собою сукупність базових (основних) одиниць, прийнятих за незалежні первинні величини, та похідних одиниць, які утворюються з базових за допомогою визначальних рівнянь фізики, що дозволяє описати будь-яке фізичне явище кількісно через комбінацію цих одиниць. Когерентність системи одиниць є ключовою властивістю, яка означає, що похідні одиниці утворюються з базових без використання числових коефіцієнтів пропорційності, що значно спрощує математичний опис фізичних законів та розрахунки в інженерній практиці; наприклад, у когерентній системі одиниця сили (ньютон) визначається як добуток одиниці маси (кілограм) на одиницю прискорення (метр на секунду в квадраті), без додаткових множників, що забезпечує пряму відповідність між фізичним законом (другий закон Ньютона) та його математичним виразом. Вибір базових одиниць є дещо умовним і залежить від історичних традицій, практичних потреб та розвитку науки - різні системи одиниць можуть використовувати різні набори базових величин для опису одних і тих самих фізичних явищ, що призводить до існування множини систем, які поступово еволюціонували від локальних та галузевих до універсальних міжнародних стандартів. Організація системи одиниць передбачає не лише визначення базових та похідних одиниць, а й установлення точних відношень між ними, створення еталонів для їх відтворення та забезпечення можливості переведення результатів вимірювань з однієї системи в іншу без втрати точності, що є особливо важливим у сучасному глобалізованому світі, де наукові та технічні дані постійно обмінюються між країнами з різними метрологічними традиціями.

Перші науково обґрунтовані системи одиниць виникли у другій половині

XIX століття, коли розвиток фізики та інженерії вимагав уніфікації мір для забезпечення співставності експериментальних даних та можливості впровадження наукових досягнень у промисловість; серед перших таких систем виділяється система СГС (сантиметр-грам-секунда), запропонована німецьким вченим Карлом Гауссом у 1832 році та подальше розвинена британським фізиком Джеймсом Клерком Максвеллом, яка використовувала сантиметр як одиницю довжини, грам — як одиницю маси, а секунду — як одиницю часу, що робило її зручною для лабораторних досліджень у галузі механіки та акустики, де розміри об'єктів та маси були відносно невеликими. Система СГС отримала широке поширення в науковій спільноті завдяки своїй простоті та когерентності, особливо в галузі теоретичної фізики, де вона дозволяла отримувати компактні математичні вирази для фізичних законів без зайвих числових коефіцієнтів; проте для інженерних розрахунків та практичних застосувань у промисловості система СГС виявилася незручною, оскільки одиниці сили (дина) та енергії (ерг) були занадто малими для опису реальних технічних процесів, що призводило до необхідності використання великих чисел у розрахунках та підвищувало ймовірність помилок. У зв'язку з цим у кінці XIX століття виникає система МКС (метр-кілограм-секунда), яка використовувала метр як одиницю довжини, кілограм - як одиницю маси, а секунду - як одиницю часу, що робило її значно більш придатною для інженерних розрахунків у будівництві, машинобудуванні та інших галузях промисловості, де характерні розміри та маси були на порядки більшими, ніж у лабораторних умовах. Система МКС поступово витісняла систему СГС у практичних застосуваннях, хоча в теоретичній фізиці, особливо в галузі електродинаміки та оптики, система СГС продовжувала використовуватися ще багато десятиліть завдяки її математичній елегантності та зручності для опису електромагнітних явищ.

Розвиток електротехніки та електромагнетизму у другій половині XIX століття створив необхідність розширення існуючих систем одиниць для врахування нових фізичних величин, пов'язаних з електричними та магнітними явищами, що призвело до створення системи МКСА (метр-кілограм-секунда-ампер), яка додала до трьох механічних базових одиниць четверту - ампер як одиницю сили електричного струму; це розширення стало можливим завдяки

роботам французького фізика Андре-Марі Ампера та німецького вченого Георга Ома, які встановили фундаментальні закони електричних кіл, що дозволили пов'язати електричні величини з механічними через вимірювання сил, що діють між провідниками зі струмом. Система МКСА стала першим кроком до створення універсальної системи одиниць, яка могла б охопити всі відомі на той час фізичні явища — механічні, теплові, електричні та магнітні, що було особливо важливим для розвитку електротехнічної промисловості, де необхідно було забезпечити єдність вимірювань при проектуванні та виготовленні електричних машин, трансформаторів, ліній електропередач та інших пристроїв. Впровадження ампера як базової одиниці дозволило визначити похідні електричні одиниці - вольт (напруга), ом (електричний опір), ват (потужність) - через механічні одиниці, що забезпечило можливість точного вимірювання електричних величин за допомогою механічних еталонів, таких як ваги та еталони довжини; це було особливо важливо в епоху, коли електричні вимірювання ще не мали достатньо точних еталонів, а механічні вимірювання були розвинені на високому рівні завдяки століттям досвіду в метрології. Система МКСА стала основою для подальшого розвитку міжнародної системи одиниць, оскільки вона вже містила чотири з семи базових одиниць сучасної системи SI, а її принципи організації були використані при створенні універсальної метрологічної системи, яка могла б задовольнити потреби як науки, так і промисловості у другій половині XX століття.

Технічна система одиниць МКГСС (метр-кілограм-секунда-сила) виникла як альтернатива системі МКС у першій половині XX століття та широко використовувалася в інженерній практиці, особливо в галузях, пов'язаних з механікою та будівництвом, де зручніше було оперувати одиницею сили (кілограм-сила) замість одиниці маси (кілограм) як базовою величиною; у цій системі кілограм-сила визначався як сила, що надає масі в один кілограм прискорення, рівне прискоренню вільного падіння (приблизно $9,81 \text{ м/с}^2$), що робило її зручною для практичних розрахунків у будівельній механіці, де навантаження часто визначалися через вагу конструкцій та матеріалів. Використання кілограм-сили як базової одиниці спрощувало розрахунки в галузях, де основними величинами були сили та навантаження, оскільки

інженери могли безпосередньо оперувати знайомими величинами, не перетворюючи масу в силу за допомогою прискорення вільного падіння, що було особливо зручно для проектування будівель, мостів, гідротехнічних споруд та інших конструкцій, де розрахунки на міцність базувалися на аналізі силових навантажень. Проте технічна система одиниць мала суттєві недоліки, пов'язані з її некогерентністю - оскільки кілограм-сила визначався через прискорення вільного падіння, яке залежить від географічної широти та висоти над рівнем моря, точне значення цієї одиниці варіювало в різних точках Землі, що створювало проблеми для забезпечення єдності вимірювань на глобальному рівні; крім того, використання сили замість маси як базової величини ускладнювало опис фундаментальних фізичних законів, таких як закон збереження імпульсу чи другий закон Ньютона, оскільки маса є інваріантною характеристикою тіла, тоді як сила залежить від умов, у яких це тіло перебуває. З появою сучасних обчислювальних засобів та уніфікацією метрологічних стандартів у другій половині XX століття технічна система одиниць поступово втратила свою актуальність та була замінена системою МКСА та її подальшим розвитком — міжнародною системою одиниць SI, яка забезпечувала когерентність та універсальність для всіх галузей науки та техніки.

Принципи організації систем одиниць фізичних величин базуються на науковому підході до вибору базових величин, який враховує як теоретичні аспекти, пов'язані з фундаментальними законами природи, так і практичні потреби, пов'язані з можливістю точного відтворення одиниць за допомогою еталонів; вибір базових величин є компромісом між мінімальністю (бажанням мати якомога менше незалежних одиниць) та зручністю (необхідністю мати одиниці, які легко відтворити та використовувати в практичних вимірюваннях). У сучасній метрології прийнято, що базові величини повинні бути взаємно незалежними, тобто жодна з них не може бути виражена через інші базові величини за допомогою фізичних законів, а також повинні мати стабільні та відтворювані еталони, які забезпечують можливість точного відтворення одиниць у будь-якому місці світу; крім того, базові величини повинні охоплювати основні аспекти фізичної реальності - простір, час, речовину, енергію, електрику, що дозволяє через похідні величини описати будь-яке

фізичне явище. Похідні одиниці утворюються з базових за допомогою визначальних рівнянь фізики, які встановлюють кількісні співвідношення між різними фізичними величинами; наприклад, одиниця швидкості (метр на секунду) утворюється як відношення одиниці довжини до одиниці часу, одиниця сили (ньютон) - як добуток одиниці маси на одиницю прискорення, одиниця енергії (джоуль) - як добуток одиниці сили на одиницю довжини, що відображає фізичні закони, які лежать в основі цих величин. Організація системи одиниць також передбачає встановлення префіксів для утворення кратних та частинних одиниць (кіло-, мега-, мілі-, мікро- тощо), що дозволяє оперувати величинами різних порядків без необхідності вводити нові одиниці для кожного конкретного випадку, а також забезпечує можливість компактного запису дуже великих або дуже малих чисел у наукових та інженерних розрахунках.

Порівняльний аналіз історичних систем одиниць дозволяє зрозуміти переваги та недоліки кожної з них у різних галузях застосування та простежити еволюцію метрологічної думки від локальних рішень до універсальних стандартів; система СГС, хоча й була дуже зручною для теоретичних досліджень у галузі класичної механіки та акустики, виявилася непридатною для практичних інженерних розрахунків через занадто малі одиниці сили та енергії, що призводило до необхідності використання великих чисел у розрахунках та підвищувало ймовірність помилок при проектуванні реальних технічних систем. У галузі електродинаміки система СГС також мала суттєві недоліки, пов'язані з існуванням кількох варіантів цієї системи (СГСЕ для електростатичних явищ, СГСМ для магнітних явищ, гаусова система для комбінованих електромагнітних явищ), що створювало плутанину та ускладнювало перехід від однієї підсистеми до іншої при розгляді складних електромагнітних процесів; крім того, відсутність окремої базової одиниці для електричних величин у системі СГС призводило до того, що електричні та магнітні одиниці виражалися через механічні одиниці з використанням різних коефіцієнтів, що ускладнювало практичні вимірювання та розрахунки в електротехніці. Система МКС, навпаки, була значно зручнішою для інженерних розрахунків у будівництві, машинобудуванні та інших галузях промисловості, де характерні розміри та маси були на порядки більшими, ніж у лабораторних умовах, а одиниці сили (ньютон) та енергії (джоуль) мали

практично зручні значення для опису реальних технічних процесів; проте відсутність окремої базової одиниці для електричних величин також обмежувало можливості системи МКС для повного опису електромагнітних явищ, що призвело до необхідності її розширення. Система МКСА усунула цей недолік, додавши ампер як четверту базову одиницю, що дозволило повністю описати електромагнітні явища в рамках однієї когерентної системи, а також забезпечило можливість точного вимірювання електричних величин через механічні еталони, що було особливо важливо в епоху становлення електротехнічної промисловості; саме система МКСА стала основою для подальшого розвитку міжнародної системи одиниць SI, яка успадкувала її принципи організації та розширила їх для охоплення нових галузей науки та техніки, таких як термодинаміка, хімія, оптика та радіаційна фізика.

Необхідність уніфікації систем одиниць фізичних величин стала особливо очевидною у другій половині XX століття, коли науково-технічний прогрес призвів до інтенсифікації міжнародного співробітництва в галузі науки, техніки та промисловості, а існування множини різних систем одиниць створювало серйозні перешкоди для обміну науковими даними, технічною документацією та промисловою продукцією між країнами; крім того, розвиток нових галузей науки, таких як квантова фізика, ядерна енергетика, космічні дослідження та молекулярна біологія, вимагав створення універсальної системи одиниць, яка могла б охопити всі відомі фізичні явища та забезпечити єдність вимірювань на глобальному рівні. Передумови для створення міжнародної системи одиниць були закладені ще наприкінці XIX століття з підписанням Метричної конвенції 1875 року, яка створила міжнародну метрологічну інфраструктуру для координації робіт з уніфікації мір, але лише після Другої світової війни, коли стала очевидною потреба в глобальній стандартизації для відновлення світової економіки та розвитку міжнародної торгівлі, було прийнято рішення про створення єдиної універсальної системи одиниць, яка замінила б усі існуючі національні та галузеві системи. У 1960 році на одинадцятій Генеральній конференції з мір і ваг була офіційно прийнята міжнародна система одиниць SI (Système International d'Unités), яка базувалася на системі МКСА, але містила шість базових одиниць (метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, світна сила) та

передбачала можливість подальшого розширення для врахування нових наукових досягнень; ця система була розроблена з урахуванням досвіду використання попередніх систем одиниць та поєднувала їхні переваги, усуваючи недоліки, пов'язані з некогерентністю, обмеженою сферою застосування та відсутністю універсальності. Прийняття системи SI стало історичною подією в розвитку метрології, оскільки воно забезпечило єдність вимірювань на глобальному рівні та створило єдину мову кількісного опису природних явищ для всіх країн світу, що сприяло інтенсифікації міжнародного наукового та технічного співробітництва, розвитку глобальної торгівлі та інтеграції національних економік у єдину світову систему; система SI продовжує розвиватися разом із наукою та технікою, постійно адаптуючись до нових вимог та забезпечуючи метрологічну основу для наукових відкриттів та технологічних інновацій у XXI столітті.

Лекція 3

Міжнародна система одиниць SI: структура, сучасний стан, перспективи розвитку

Історія створення міжнародної системи одиниць SI сягає корінням у другу половину XIX століття, коли індустріальна революція та інтенсифікація міжнародної торгівлі створили нагальну потребу в універсальних, точно визначених та відтворюваних одиницях вимірювання, які могли б забезпечити єдність вимірювань на глобальному рівні; у 1875 році у Парижі була підписана Метрична конвенція, міжнародний договір, що став першим кроком до створення глобальної метрологічної інфраструктури та об'єднав 17 країн-засновниць, серед яких були Франція, Німеччина, Велика Британія, Російська імперія, США та інші провідні держави того часу, які усвідомлювали, що відсутність єдиних мір перешкоджає розвитку міжнародної торгівлі, наукового співробітництва та технічного прогресу. Конвенція передбачала створення трьох постійних органів: Генеральної конференції з мір і ваг (CGPM) як вищого керівного органу, який приймає рішення щодо основних напрямків розвитку метрології; Міжнародного комітету з мір і ваг (CIPM) як виконавчого органу, що координує наукові та технічні роботи; та Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM) зі штаб-квартирою у Севрі поблизу Парижа, яке мало забезпечувати зберігання міжнародних еталонів, проводити порівняльні вимірювання та розробляти нові методи відтворення одиниць. У період з 1889 по 1960 рік метрична система поступово вдосконалювалася: були виготовлені нові міжнародні прототипи метра та кілограма зі сплаву платини та іридію, які замінили оригінальні еталони 1799 року, були визначені додаткові одиниці для вимірювання електричних величин, температури та світлових величин, але лише у 1960 році на одинадцятій Генеральній конференції з мір і ваг була офіційно прийнята система SI (Système International d'Unités) як універсальна міжнародна система одиниць, яка об'єднала попередні розробки в єдину когерентну структуру з шістьма базовими одиницями (метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, кандела) та чітко визначеними принципами утворення похідних одиниць, що стало справжньою

революцією в метрології та заклало основу для сучасної глобальної метрологічної системи, яка сьогодні використовується практично у всіх країнах світу за винятком деяких, де традиційні одиниці зберігаються лише в повсякденному побутовому вжитку.

Система SI станом до 2019 року базувалася на семи базових одиницях, кожна з яких мала власний еталон або метод відтворення, що забезпечував її точне визначення та відтворення в будь-якій лабораторії світу за умови наявності відповідного обладнання; ці одиниці були обрані таким чином, щоб охопити основні аспекти фізичної реальності - простір, час, речовину, електрику, тепло та світло - і забезпечити можливість опису будь-якого фізичного явища через комбінацію цих базових величин. Нижче наведено в табл. 1 базові одиниці SI:

Таблиця 1- Основні одиниці SI

Базова величина	Одиниця	Символ	Еталон
Довжина	метр	м	Спеціальна встановка для вимірювання довжини за допомогою лазера з точно відомою частотою
Маса	кілограм	кг	Фізичний еталон - циліндр діаметром і висотою 39 мм зі сплаву 90% платини та 10% іридію
Час	секунда	с	Атомний годинник на основі цезію
Сила електричного струму	ампер	А	Система для вимірювання сили між провідниками зі струмом
Термодинамічна температура	кельвін	К	Спеціальна установка для відтворення потрійної точки води
Кількість речовини	моль	моль	Зразки з точно відомою кількістю атомів
Сила світла	кандела	кд	Спеціальна лампа з точно відомими характеристиками

Ця система, хоча й була революційною для свого часу, мала суттєвий недолік — залежність від фізичного артефакту (Міжнародного прототипу кілограма), маса якого могла змінюватися з часом через адсорбцію молекул газів, втрату матеріалу під час чищення або інші фактори, що створювало ризик для стабільності всієї метрологічної системи, оскільки зміна маси прототипу кілограма автоматично змінювала б значення всіх похідних одиниць, пов'язаних

з масою, таких як ньютон, джоуль, ват тощо.

Революційна зміна у метрології відбулася 20 травня 2019 року, коли на двадцять шостій Генеральній конференції з мір і ваг було прийнято рішення про повне переозначення всіх семи базових одиниць SI через фундаментальні фізичні константи, що мають незмінні значення у Всесвіті; цей крок завершив багатостолітній процес переходу від антропометричних мір через фізичні еталони до визначень, базованих на незмінних законах природи, що забезпечує абсолютну стабільність одиниць незалежно від часу, місця або матеріальних умов. Згідно з новою редакцією, кожна базова одиниця тепер визначається шляхом фіксації точної чисельної величини однієї з фундаментальних констант природи: метр — через швидкість світла у вакуумі ($c = 299\,792\,458$ м/с), секунда - через гіпертонову частоту переходу атома цезію-133 ($\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ Гц), кілограм — через сталу Планка ($h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), ампер - через елементарний заряд ($e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ Кл), кельвін - через сталу Больцмана ($k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), моль - через число Авогадро ($N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹), кандела - через фотометричну сталу ($K_{\text{cd}} = 683$ лм/Вт для частоти $540 \cdot 10^{12}$ Гц). Ця зміна не призвела до практичних змін у повсякденних вимірюваннях - значення одиниць залишилися тими самими, що й раніше, - але радикально змінила принцип їхнього визначення, перетворивши метрологію з науки, що базується на матеріальних артефактах, на науку, що базується на фундаментальних законах фізики; тепер будь-яка країна з достатньо розвиненою науковою інфраструктурою може відтворити будь-яку базову одиницю незалежно від інших країн, використовуючи лише універсальні константи природи, що забезпечує абсолютну демократизацію метрології та усуває ризики, пов'язані з пошкодженням або втратою фізичних еталонів. Нижче наведено порівняльну табл. 2 змін у визначеннях базових одиниць після реформи 2019 року.

Похідні одиниці SI утворюються з базових одиниць шляхом алгебраїчних операцій множення та ділення відповідно до визначальних рівнянь фізики, і серед них виділяються 22 одиниці, які мають спеціальні назви та символи для зручності використання у науковій та інженерній практиці; ці одиниці охоплюють широкий спектр фізичних величин - від механічних (сила, тиск, енергія) до електричних

(напруга, опір, ємність), теплових (теплота, ентропія), оптичних (світловий потік, освітленість) та радіаційних (активність, поглинута доза) величин. Нижче наведено табл.3 похідні одиниці SI.

Таблиця 2 - Зміни у визначеннях базових одиниць після реформи 2019 року

Одиниця	Константа, що фіксується	Значення константи	Переваги нового визначення
кілограм	Стала Планка (h)	6,626 070 15 · 10 ⁻³⁴ Дж·с	Незалежність від фізичного артефакту; можливість відтворення через ваги Кіббла або метод XXX
ампер	Елементарний заряд (e)	1,602 176 634 · 10 ⁻¹⁹ Кл	Точніше визначення через квантові явища; сумісність з квантовими стандартами струму
кельвін	Стала Больцмана (k)	1,380 649 · 10 ⁻²³ Дж/К	Прямий зв'язок з енергією частинок; можливість вимірювання температури в широкому діапазоні
моль	Число Авогадро (N _A)	6,022 140 76 · 10 ²³ моль ⁻¹	Незалежність від маси вуглецю-12; можливість визначення через кристали кремнію

Важливо зазначити, що деякі одиниці, такі як градус Цельсія, хоча й мають спеціальну назву, не є окремою базовою одиницею, а є похідною від кельвіна зі зміщеним нулем ($0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$), що забезпечує зручність у повсякденному використанні для вимірювання температури навколишнього середовища; також варто підкреслити, що одиниці радіаційних величин (грей, зіверт) мають однакову розмірність ($\text{м}^2/\text{с}^2$), але відрізняються фізичним змістом - грей вимірює поглинуту енергію на одиницю маси, тоді як зіверт враховує біологічний ефект різних типів випромінювання через введення коефіцієнтів якості.

Таблиця 3 – Похідні одиниці SI

Величина	Одиниця	Символ	Вираз через базові одиниці SI	Вираз через інші пох. од.
Частота	герц	Гц	с^{-1}	—
Сила	ньютон	Н	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$	—
Тиск, механічна напруга	паскаль	Па	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$	$\text{Н}/\text{м}^2$
Енергія, робота, кількість теплоти	джоуль	Дж	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$	$\text{Н} \cdot \text{м}$
Потужність, потік енергії	ват	Вт	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$	$\text{Дж}/\text{с}$
Електричний заряд	кулон	Кл	$\text{с} \cdot \text{А}$	—
Електрична напруга, різниця потенціалів	вольт	В	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$	$\text{Вт}/\text{А}$, $\text{Дж}/\text{Кл}$
Електричний опір	ом	Ом	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$	$\text{В}/\text{А}$
Електрична ємність	фарад	Ф	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$	$\text{Кл}/\text{В}$
Магнітний потік	вебер	Вб	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$	$\text{В} \cdot \text{с}$
Магнітна індукція	тесла	Тл	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$	$\text{Вб}/\text{м}^2$
Індуктивність	генрі	Гн	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$	$\text{Вб}/\text{А}$
Термодинамічна температура	градус Цельсія	$^{\circ}\text{С}$	К	—
Світловий потік	люмен	лм	ср·кд	—
Освітленість	люкс	лк	$\text{м}^{-2} \cdot \text{ср} \cdot \text{кд}$	$\text{лм}/\text{м}^2$
Активність нукліда	бекерель	Бк	с^{-1}	—
Поглинута доза іонізуючого випромінювання	грей	Гр	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$	$\text{Дж}/\text{кг}$
Еквівалентна доза іонізуючого випромінювання	зіверт	Зв	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$	$\text{Дж}/\text{кг}$
Експозиційна доза рентгенівського та гамма-випромінювання	кулон на кілограм	Кл/кг	$\text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{кг}^{-1}$	—

Майбутнє метрології пов'язане з подальшим розвитком квантових еталонів, інтеграцією метрологічних систем у цифрову інфраструктуру та розширенням

застосування точних вимірювань у нових галузях науки та техніки; квантові еталони, які базуються на дискретних енергетичних рівнях атомів, молекул або твердотільних систем, вже сьогодні забезпечують найвищу точність відтворення одиниць електричних величин (напруга через ефект Джозефсона, опір через квантовий ефект Холла), а подальший розвиток квантових технологій дозволить створити практичні квантові еталони для інших величин, таких як маса, температура чи час. Розвиток квантових годинників відкриє нові можливості для геодезії та навігації - оскільки хід часу залежить від гравітаційного потенціалу згідно з загальною теорією відносності, порівняння показань оптичних годинників, розташованих на різних висотах, дозволить вимірювати різницю геопотенціалу з точністю, яка перевершує можливості сучасних геодезичних методів, що матиме важливе значення для моніторингу змін рівня моря, рухів земної кори та інших геофізичних процесів. Інтернет речей (IoT) створює нові виклики та можливості для метрології - мільярди датчиків, вбудованих у промислове обладнання, транспортні засоби, будівлі та побутові пристрої, постійно генерують потоки вимірювальних даних, які потребують забезпечення їхньої точності, достовірності та сумісності; це призводить до розвитку концепції «цифрового метрологічного простору», де калібрування датчиків, оцінка невизначеності вимірювань та прослідковуваність до еталонів здійснюються автоматично через хмарні платформи та блокчейн-технології, що забезпечує прозорість та надійність вимірювальних даних у реальному часі. Глобальна метрологічна інфраструктура продовжує розвиватися шляхом посилення співпраці між національними метрологічними інститутами, розширення мережі порівняльних вимірювань та гармонізації метрологічних вимог на міжнародному рівні, що особливо важливо в умовах глобалізації економіки та інтенсифікації міжнародної торгівлі; сьогодні більше 100 країн світу мають власні національні метрологічні інститути, які забезпечують реалізацію одиниць SI на території своїх країн та беруть участь у міжнародних метрологічних порівняннях, що гарантує еквівалентність вимірювань незалежно від місця їх проведення.

Лекція 4

Вимірювання фізичних величин: поняття, класифікація та методи

Вимірювання - процес у науці, техніці та повсякденному житті, який полягає у знаходженні значення фізичної величини шляхом її порівняння з однорідною величиною, прийнятою за одиницю; цей процес є основою кількісного опису навколишнього світу та забезпечує можливість об'єктивної оцінки фізичних явищ, що дозволяє робити наукові висновки, проектувати технічні системи та приймати управлінські рішення на основі достовірних даних. Згідно з міжнародною метрологічною термінологією (VIM - Vocabulary of International Metrology), вимірювання визначається як процес експериментального отримання одного або декількох значень величини, що можуть бути обґрунтовано приписані цій величині, що підкреслює не лише технічний аспект порівняння з еталоном, а й необхідність наукового обґрунтування результатів вимірювання через аналіз похибок та невизначеності. Будь-яке вимірювання складається з трьох основних компонентів: об'єкта вимірювання (фізичного явища, властивості або стану, який підлягає вимірюванню), засобу вимірювання (технічного пристрою, призначеного для отримання значень вимірюваної величини) та суб'єкта вимірювання (особи або автоматизованої системи, яка здійснює вимірювання та інтерпретує його результати); крім того, вимірювання завжди проводиться в певному середовищі, яке може впливати на результат через зовнішні фактори, такі як температура, вологість, тиск, електромагнітні поля тощо, тому контроль умов вимірювання є важливою складовою забезпечення їхньої точності. Результат вимірювання представляє собою сукупність числового значення та одиниці вимірювання, але сучасна метрологія вимагає також вказувати невизначеність результату - оцінку можливого відхилення вимірюваного значення від істинного, що забезпечує можливість порівняння результатів, отриманих різними методами та в різний час, та оцінки їхньої надійності для прийняття рішень.

Класифікація вимірювань проводиться за різними ознаками, що дозволяє

систематизувати різноманітні підходи до отримання кількісної інформації про фізичні величини та вибрати найбільш доцільний метод для конкретної задачі; за кількістю вимірюваних величин розрізняють окремі вимірювання, коли визначається значення однієї фізичної величини, та комплексні вимірювання, коли одночасно вимірюється декілька пов'язаних величин, що характерно для діагностики складних технічних систем або медичних обстежень. За способом отримання результату вимірювання поділяються на прямі, коли значення величини отримують безпосередньо з показань засобу вимірювання (наприклад, вимірювання довжини лінійкою або маси терезами), та непрямі, коли значення величини обчислюють на основі результатів вимірювання інших величин, пов'язаних з нею відомою функціональною залежністю (наприклад, визначення густини речовини через вимірювання маси та об'єму, або розрахунок потужності електричного кола через вимірювання напруги та струму); непрямі вимірювання широко застосовуються у випадках, коли пряме вимірювання неможливе або недоцільне через технічні обмеження або високу вартість відповідних засобів вимірювання. За кількістю вимірювань розрізняють одноразові вимірювання, які проводяться для отримання поточного значення величини, та багаторазові вимірювання, коли одне й те саме значення вимірюється декілька разів для підвищення точності результату шляхом усереднення та виявлення грубих помилок; багаторазові вимірювання особливо важливі при наявності випадкових похибок, оскільки дозволяють застосувати статистичні методи обробки результатів для отримання більш достовірної оцінки вимірюваної величини.

Методи вимірювань представляють собою сукупність прийомів використання засобів вимірювання та принципів вимірювання для отримання результату з необхідною точністю, і вони класифікуються за різними ознаками залежно від фізичної суті процесу та способу порівняння вимірюваної величини з еталоном; серед основних методів вимірювань виділяють метод безпосередньої оцінки, коли значення величини відлічується безпосередньо за шкалою вимірювального приладу (наприклад, вимірювання напруги вольтметром або температури термометром), та метод порівняння з мірою, коли вимірювана величина порівнюється з відомим значенням еталона, що забезпечує вищу точність за рахунок використання стабільних та точно відкаліброваних зразків.

Метод порівняння з мірою поділяється на кілька підметодів: метод зіставлення, коли вимірювана величина та міра одночасно впливають на засіб порівняння (наприклад, зважування на рівноплечих терезах, де порівнюються маси тіла та гир); метод протиставлення, коли вимірювана величина та міра діють на засіб порівняння по черзі (наприклад, вимірювання опору мостом Уїтстона); метод заміщення, коли вимірювана величина заміщується мірою зі збереженням показань засобу вимірювання (наприклад, вимірювання маси на нерівноплечих терезах шляхом заміни тіла гирями); та метод збігу, коли різниця між вимірюваною величиною та мірою визначається за збігом певних ознак (наприклад, вимірювання довжини за допомогою штангенциркуля з ноніусом, де збіг поділок ноніуса та основної шкали вказує на дробову частину вимірювання). Крім цих класичних методів, існують спеціалізовані методи вимірювань, такі як метод нульового балансу, коли вимірювана величина компенсується протидіючою величиною до повного зрівноваження системи (що забезпечує високу точність, оскільки вимірювальний пристрій працює в режимі нульового сигналу), метод диференційного вимірювання, коли вимірюється не сама величина, а її відхилення від відомого значення (що дозволяє використовувати менш точні засоби вимірювання для вимірювання малих змін великих значень), та метод інтегрування, коли вимірюється середнє значення величини за певний проміжок часу (наприклад, лічильники електричної енергії).

Принципи вимірювань визначають фізичні явища або ефекти, на яких базується робота засобів вимірювальної техніки, і вони є основою для розробки нових методів та приладів вимірювання; сучасна метрологія використовує широкий спектр фізичних принципів, починаючи від класичних механічних ефектів (деформація пружних елементів під дією сили, розширення рідини при нагріванні) та закінчуючи сучасними квантовими явищами (ефект Джозефсона для вимірювання напруги, квантовий ефект Холла для вимірювання опору, атомні переходи для вимірювання часу). Серед найбільш поширених принципів вимірювань можна виділити: механічні принципи, які базуються на законах класичної механіки (закон Гука для вимірювання сили через деформацію пружини, принцип Архімеда для вимірювання густини через витіснення рідини); термодинамічні принципи, які використовують залежність фізичних

властивостей речовин від температури (терморозширення рідин для ртутних термометрів, зміна електричного опору металів для термометрів опору, термоелектричний ефект для термопар); електричні та магнітні принципи, які базуються на законах електродинаміки (закон Ома для вимірювання опору через напругу та струм, електромагнітна індукція для вимірювання швидкості руху провідника в магнітному полі, п'єзоелектричний ефект для вимірювання тиску через генерацію електричного заряду в кристалах); оптичні принципи, які використовують властивості світла (інтерференція для вимірювання довжини з нанометровою точністю, поляризація для вимірювання концентрації речовин, поглинання світла для вимірювання товщини шарів); та радіаційні принципи, які базуються на взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною (іонізація газу для вимірювання радіації, сцинтиляція для вимірювання енергії частинок). Вибір принципу вимірювання залежить від багатьох факторів, включаючи діапазон вимірюваної величини, необхідну точність, умови проведення вимірювання, вартість засобів вимірювання та вимоги до їхньої надійності та довговічності; сучасні засоби вимірювання часто використовують комбінацію кількох принципів для досягнення оптимальних характеристик, наприклад, сучасні мультиметри поєднують електричні принципи вимірювання з цифровою обробкою сигналів та оптичним відображенням результатів.

Лекція 5

Засоби вимірювальної техніки: структура, класифікація та типи

Засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) представляють собою технічні засоби, призначені для виконання вимірювань, які мають нормовані метрологічні характеристики та забезпечують отримання результатів вимірювань з відомою точністю; вони є матеріальною основою метрології та відіграють ключову роль у забезпеченні єдності вимірювань у всіх сферах людської діяльності - від фундаментальних наукових досліджень до повсякденного контролю якості продукції та послуг. Згідно з міжнародною класифікацією, засоби вимірювальної техніки поділяються на міри, вимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, допоміжні засоби вимірювань та вимірювальні системи, кожен з яких має своє призначення та особливості конструкції; міра - це засіб вимірювання, який відтворює фізичну величину заданого розміру (наприклад, гиря відтворює масу, нормальний елемент відтворює електрорушійну силу, еталон метра відтворює довжину), вимірювальний прилад - це засіб вимірювання, в якому вимірювана величина перетворюється на сигнал вимірювальної інформації, зручний для безпосереднього спостереження (наприклад, вольтметр, амперметр, термометр), вимірювальний перетворювач - це засіб вимірювання, який перетворює вимірювану величину в іншу величину або сигнал, зручніший для обробки, передачі або зберігання (наприклад, термopара перетворює температуру в електричну напругу, тензодатчик перетворює силу в зміну електричного опору), а вимірювальна система - це сукупність засобів вимірювань, об'єднаних між собою для автоматизованого виконання певних вимірювальних операцій. Сучасні засоби вимірювальної техніки характеризуються високим ступенем інтеграції, використанням мікропроцесорної техніки для обробки сигналів, можливістю цифрового відображення результатів та передачі даних у комп'ютерні мережі, що дозволяє автоматизувати процеси вимірювання, зберігання та аналізу вимірювальної інформації, а також забезпечує можливість дистанційного моніторингу та керування вимірювальними процесами.

Структурні елементи засобів вимірювань утворюють єдину систему, яка забезпечує перетворення вимірюваної фізичної величини в результат вимірювання, зручний для сприйняття користувачем або подальшої обробки; типова структура сучасного засобу вимірювання включає первинний вимірювальний перетворювач (сенсор або датчик), який безпосередньо контактує з об'єктом вимірювання та перетворює вимірювану фізичну величину в проміжний сигнал (наприклад, термopара перетворює температуру в термоелектрорушійну силу, тензодатчик перетворює механічну деформацію в зміну електричного опору); вимірювальний ланцюг, який виконує підсилення, фільтрацію, лінеаризацію та інші перетворення проміжного сигналу для підвищення його якості та відповідності вимогам до результату вимірювання; аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який перетворює аналоговий сигнал у цифровий код для подальшої обробки мікропроцесором; мікропроцесорний блок, який виконує обчислення результату вимірювання, компенсацію впливу зовнішніх факторів, зберігання даних та керування роботою приладу; пристрій відображення результатів (дисплей, індикатор, друкуючий пристрій), який забезпечує представлення результату вимірювання у зручній для користувача формі; та блок живлення, який забезпечує електричну енергію для роботи всіх елементів приладу. У багатьох сучасних засобах вимірювання також передбачені додаткові елементи, такі як інтерфейси для зв'язку з комп'ютером або мережею (USB, RS-232, Ethernet, Wi-Fi), блоки пам'яті для зберігання результатів вимірювань, програмні засоби для обробки даних та візуалізації результатів, а також засоби самодіагностики для контролю справності приладу та виявлення можливих несправностей. Структура засобів вимірювання може значно варіюватися залежно від призначення приладу, діапазону вимірюваної величини, необхідної точності та умов експлуатації — від простих механічних приладів, таких як лінійка або ртутний термометр, де структура зводиться до одного елемента (міри довжини або термометричної рідини), до складних багатоканальних вимірювальних систем, які включають десятки різноманітних елементів та забезпечують автоматизоване виконання комплексних вимірювальних операцій.

Класифікація вимірювальних приладів проводиться за різними ознаками,

що дозволяє систематизувати різноманітні типи засобів вимірювання та вибрати найбільш доцільний прилад для конкретної задачі; за способом подання результатів вимірювання розрізняють аналогові прилади, у яких результат відображається у вигляді неперервної функції (наприклад, відхилення стрілки на шкалі, положення стовпчика рідини в капілярі), та цифрові прилади, у яких результат відображається у вигляді дискретних числових значень на цифровому індикаторі або дисплеї; аналогові прилади мають перевагу у візуалізації динаміки зміни вимірюваної величини, тоді як цифрові прилади забезпечують більш високу точність зчитування результатів та можливість автоматичної обробки даних. За функціональним призначенням вимірювальні прилади поділяються на показуючі, які лише відображають поточне значення вимірюваної величини; реєструючі, які фіксують зміну величини в часі у вигляді графіків, таблиць або цифрових файлів; порівнюючі, які призначені для порівняння вимірюваної величини з еталоном (наприклад, мости, компенсатори); та суміщені, які поєднують кілька функцій у одному приладі (наприклад, мультиметри, які можуть вимірювати напругу, струм, опір та інші електричні величини). За ступенем автоматизації розрізняють ручні прилади, які вимагають безпосередньої участі оператора для виконання вимірювання та зчитування результатів; автоматичні прилади, які виконують вимірювання без участі оператора за заданою програмою; та автоматизовані системи вимірювання, які поєднують вимірювальні прилади з комп'ютерною технікою для комплексної обробки та аналізу результатів. За умовами експлуатації вимірювальні прилади поділяються на лабораторні, які призначені для використання в умовах стаціонарних лабораторій з контролемованими параметрами навколишнього середовища; переносні, які можуть використовуватися в різних місцях, включаючи польові умови; та стаціонарні, які встановлюються на промислових об'єктах для постійного моніторингу технологічних параметрів.

Основні типи вимірювальних приладів охоплюють широкий спектр фізичних величин, які можуть бути виміряні за допомогою сучасних засобів вимірювальної техніки; серед найбільш поширених типів можна виділити електровимірювальні прилади, які призначені для вимірювання електричних величин - вольтметри (напруга), амперметри (струм), омметри (опір), ватметри

(потужність), частотоміри (частота), фазометри (зсув фаз), мегомметри (високий опір), та багатофункціональні мультиметри, які поєднують функції кількох приладів у одному корпусі. Механічні вимірювальні прилади використовуються для вимірювання механічних величин - динамометри (сила), манометри (тиск), вакуумметри (розрідження), барометри (атмосферний тиск), тензометри (деформація), акселерометри (прискорення), віброметри (вібрація), та інші прилади для вимірювання лінійних та кутових переміщень, швидкостей, обертових моментів тощо. Тепловимірювальні прилади призначені для вимірювання температурних величин - термометри різних типів (рідинні, біметалічні, опору, термопари), пірометри (температура за випромінюванням), тепломіри (кількість теплоти), та прилади для вимірювання теплових потоків та теплопровідності матеріалів. Оптичні вимірювальні прилади використовують властивості світла для вимірювання різноманітних величин - мікроскопи та телескопи (збільшення зображень), інтерферометри (вимірювання довжин з високою точністю), спектрометри (аналіз спектрального складу випромінювання), фотометри (вимірювання світлових величин), та прилади для вимірювання оптичних характеристик матеріалів (показник заломлення, поглинання, розсіювання). Радіаційні вимірювальні прилади призначені для виявлення та вимірювання іонізуючого випромінювання - лічильники Гейгера-Мюллера, сцинтиляційні детектори, іонізаційні камери, дозиметри, та прилади для вимірювання активності радіонуклідів та поглиненої дози випромінювання. Сучасні вимірювальні прилади часто мають універсальний характер, поєднуючи можливість вимірювання різних фізичних величин у рамках одного пристрою, що забезпечує економію коштів, зручність експлуатації та можливість комплексного аналізу об'єкта вимірювання.

Лекція 6

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки

Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки є кількісними параметрами, які визначають властивості засобів вимірювань, що впливають на результати вимірювань та їх похибки, і вони є основою для оцінки придатності засобу вимірювання до виконання конкретних вимірювальних задач; згідно з міжнародними стандартами, метрологічні характеристики повинні бути нормовані в технічній документації на засіб вимірювання (паспорт, технічний опис, інструкція з експлуатації) та підтверджуватися результатами державних випробувань або калібрування, що забезпечує можливість об'єктивної оцінки якості вимірювань та порівняння різних засобів вимірювання між собою. Метрологічні характеристики поділяються на кілька груп залежно від того, які властивості засобу вимірювання вони характеризують: характеристики, що визначають діапазон вимірювань та чутливість; характеристики, що визначають точність вимірювань; характеристики, що визначають вплив зовнішніх умов на результати вимірювань; та динамічні характеристики, що визначають поведінку засобу вимірювання при зміні вимірюваної величини в часі. Нормування метрологічних характеристик проводиться згідно з вимогами міжнародних стандартів (Міжнародної організації законодавчої метрології OIML, Міжнародного бюро мір і ваг BIPM) та національних стандартів (ДСТУ в Україні), що забезпечує єдність підходів до оцінки якості засобів вимірювання на глобальному рівні та можливість міжнародного визнання результатів вимірювань.

Основні метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки включають діапазон вимірювань, який визначає мінімальне та максимальне значення вимірюваної величини, для яких засіб вимірювання забезпечує нормовані метрологічні характеристики; діапазон вимірювань може бути суцільним (від мінімального до максимального значення без перерв) або дискретним (складатися з окремих піддіапазонів); для багатьох приладів діапазон вимірювань може бути розширений за рахунок використання додаткових

пристроїв (подільників напруги, шунтів для струму, трансформаторів тощо), що дозволяє використовувати один і той самий прилад для вимірювання величин різних порядків. Чутливість засобу вимірювання визначається як відношення зміни сигналу на виході приладу до викликаючої її зміни вимірюваної величини на вході, і вона характеризує здатність приладу реагувати на малі зміни вимірюваної величини; висока чутливість є бажаною характеристикою для приладів, призначених для вимірювання малих сигналів, але вона може призводити до збільшення впливу завад та нестабільності показань, тому при проектуванні засобів вимірювання необхідно знаходити оптимальний баланс між чутливістю та стійкістю роботи. Ціна поділки шкали (для аналогових приладів) або дискретність відліку (для цифрових приладів) визначає мінімальне значення вимірюваної величини, яке може бути відображено на виході приладу; для аналогових приладів ціна поділки визначається як відношення діапазону вимірювань до кількості поділок на шкалі, тоді як для цифрових приладів дискретність відліку визначається кількістю розрядів аналого-цифрового перетворювача та діапазоном вимірювань. Поріг чутливості (або поріг реагування) — це найменша зміна вимірюваної величини, яка викликає помітну зміну показань приладу, і вона характеризує здатність приладу виявляти дуже малі сигнали; поріг чутливості особливо важливий для приладів, які використовуються для вимірювання слабких сигналів або для детекції наявності величини без необхідності точного визначення її значення.

Точність вимірювань є однією з найважливіших метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки, оскільки вона визначає ступінь наближення результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини; точність засобу вимірювання характеризується кількома параметрами, серед яких основними є похибка засобу вимірювання, невизначеність вимірювання та клас точності. Похибка засобу вимірювання визначається як різниця між показанням приладу та істинним (або дійсним) значенням вимірюваної величини, і вона може бути абсолютною (вираженою в одиницях вимірюваної величини) або відносною (вираженою у відсотках від вимірюваного значення або діапазону вимірювань); похибки поділяються на систематичні (які залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних

вимірюваннях) та випадкові (які змінюються випадковим чином при повторних вимірюваннях); систематичні похибки можуть бути виявлені та скориговані шляхом калібрування приладу, тоді як випадкові похибки можуть бути лише зменшені шляхом багаторазових вимірювань та статистичної обробки результатів. Невизначеність вимірювання — це параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, який характеризує розсіювання значень, які могли б бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині; на відміну від похибки, яка є конкретним відхиленням від істинного значення, невизначеність характеризує інтервал, у межах якого з певною ймовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини; невизначеність вимірювання включає внески від різних джерел: невизначеність засобу вимірювання, невизначеність методу вимірювання, невизначеність впливу зовнішніх умов, невизначеність оператора тощо. Клас точності - це узагальнена характеристика засобу вимірювання, яка визначає його точнісні властивості та виражається у вигляді числа або позначення, встановленого стандартами; клас точності визначає граничні значення допустимих основної та додаткової похибок засобу вимірювання, а також інші характеристики, що впливають на точність вимірювань; у багатьох країнах, включаючи Україну, класи точності позначаються арабськими цифрами (0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0), де менше число відповідає вищій точності приладу.

Вплив зовнішніх умов на результати вимірювань характеризується додатковими похибками, які виникають при відхиленні умов вимірювання від нормальних (нормальних умов); нормальних умови вимірювання визначаються стандартами та зазвичай включають температуру (20 ± 2 °C для лабораторних умов), вологість повітря (65 ± 15 %), атмосферний тиск ($101,3 \pm 4$ кПа), відсутність зовнішніх електромагнітних полів, вібрацій та інших факторів, які можуть впливати на роботу засобу вимірювання. Коефіцієнти впливу характеризують залежність похибки засобу вимірювання від зміни певного зовнішнього фактора; наприклад, температурний коефіцієнт визначає зміну похибки приладу при зміні температури навколишнього середовища на один градус, а коефіцієнт впливу вологи — зміну похибки при зміні вологості на один відсоток; знання коефіцієнтів впливу дозволяє вносити поправки до результатів

вимірювань при роботі в умовах, відмінних від нормальних, або оцінювати додаткову невизначеність, пов'язану з відхиленням умов від нормальних. Динамічні характеристики засобів вимірювання визначають їхню поведінку при зміні вимірюваної величини в часі; до динамічних характеристик належать час реакції (час, протягом якого прилад досягає сталого показання після стрибкоподібної зміни вимірюваної величини), смуга пропускання (діапазон частот, у якому прилад забезпечує нормовані метрологічні характеристики), та амплітудно-частотна характеристика (залежність амплітуди вихідного сигналу від частоти вхідного сигналу); динамічні характеристики особливо важливі для приладів, які використовуються для вимірювання швидкозмінних величин, таких як вібрації, пульсації тиску, високочастотні електричні сигнали тощо.

Калібрування та повірка засобів вимірювальної техніки є обов'язковими процедурами для забезпечення їхньої метрологічної надійності та підтвердження відповідності нормованим метрологічним характеристикам; калібрування — це сукупність операцій, які встановлюють співвідношення між значеннями величини, що відтворюються еталоном, та відповідними показаннями засобу вимірювання з метою визначення його метрологічних характеристик; калібрування проводиться за потребою користувача або за графіком, встановленим технічною документацією, і результати калібрування оформляються у вигляді калібрувального сертифіката або свідоцтва, яке містить значення поправок до показань приладу та оцінку невизначеності калібрування. Повірка — це визначення метрологічних характеристик засобу вимірювання з метою підтвердження їх відповідності встановленим вимогам та придатності засобу вимірювання до застосування; на відміну від калібрування, повірка має правовий характер і проводиться для засобів вимірювання, які застосовуються в сферах, підлеглих державному метрологічному нагляду (торгівля, охорона здоров'я, екологія, оборона тощо); результати повірки підтверджуються клеймом повірки або свідоцтвом про повірку, і засіб вимірювання, який не пройшов повірку або має відхилення від нормованих характеристик, не може бути застосований у сферах державного метрологічного нагляду. Періодичність калібрування та повірки визначається міжповірочним інтервалом, який встановлюється залежно від типу засобу вимірювання, умов його експлуатації,

вимог до точності вимірювань та результатів попередніх калібрувань або повірок; для багатьох засобів вимірювання міжповірочний інтервал становить від шести місяців до двох років, але для особливо точних або критичних приладів він може бути скорочений до кількох місяців або навіть тижнів. Сучасні системи забезпечення єдності вимірювань передбачають постійний моніторинг метрологічного стану засобів вимірювання, ведення баз даних про результати калібрувань та повірок, та впровадження систем якості, які гарантують надійність вимірювальної інформації на всіх етапах її отримання, обробки та використання.

Лекція 7

Похибки вимірювань: загальні положення, класифікація та характеристика результатів вимірювань

Похибка вимірювання є невід'ємною характеристикою будь-якого вимірювального процесу, оскільки ідеальних вимірювань, які б абсолютно точно відображали істинне значення вимірюваної величини, не існує в силу об'єктивних обмежень засобів вимірювання, методів вимірювання та умов проведення вимірювань; згідно з міжнародною метрологічною термінологією (VIM), похибка вимірювання визначається як різниця між виміряним значенням величини та еталонним значенням, яке може бути істинним значенням (у випадках, коли воно відоме) або дійсним значенням (значенням, отриманим за допомогою еталонного засобу вимірювання з достатньо високою точністю); похибка є кількісною характеристикою якості вимірювання, яка дозволяє оцінити ступінь відхилення результату від істинного значення та визначити придатність вимірювання для вирішення конкретної задачі. Важливо розуміти, що похибка вимірювання не є ознакою некваліфікованості оператора або низької якості засобів вимірювання, а є об'єктивним наслідком скінченної точності будь-якого вимірювального процесу, тому метою метрології є не повне усунення похибок (що неможливо), а їх мінімізація до прийнятного рівня та кількісна оцінка залишкових похибок для забезпечення достовірності результатів вимірювань. Похибки вимірювань можуть виникати на будь-якому етапі вимірювального процесу — від вибору методу вимірювання та засобів вимірювання до обробки результатів та їх інтерпретації, тому для забезпечення якості вимірювань необхідно враховувати всі можливі джерела похибок та вживати заходів для їх зменшення або компенсації.

Класифікація похибок вимірювань проводиться за різними ознаками, що дозволяє систематизувати різноманітні типи відхилень результатів вимірювань від істинних значень та вибрати найбільш ефективні методи їх зменшення або компенсації; за характером прояву похибки поділяються на систематичні,

випадкові та грубі (промахи); систематичні похибки залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях однієї й тієї самої величини в однакових умовах, вони можуть бути викликані неправильною калібруванням засобів вимірювання, конструктивними недоліками приладів, методичними помилками у вибраному методі вимірювання або впливом зовнішніх факторів, які не були враховані при проведенні вимірювань; випадкові похибки змінюються випадковим чином при повторних вимірюваннях, вони викликані сукупністю невеликих, неконтрольованих факторів, які впливають на результат вимірювання, таких як флуктуації електричних сигналів, вібрації, зміни температури навколишнього середовища, суб'єктивні особливості оператора при зчитуванні показань приладу тощо; грубі похибки (промахи) є результатом грубих помилок оператора, несправності засобів вимірювання або виняткових зовнішніх впливів, вони значно перевищують очікувані похибки за даних умов вимірювання та повинні бути виявлені та виключені з результатів вимірювань на етапі їх обробки. За джерелом виникнення похибки поділяються на інструментальні (похибки засобів вимірювання), методичні (похибки методу вимірювання), суб'єктивні (похибки оператора) та зовнішні (похибки, викликані впливом умов вимірювання); за способом вираження похибки поділяються на абсолютні (виражені в одиницях вимірюваної величини) та відносні (виражені у відсотках від вимірюваного значення або діапазону вимірювань); за залежністю від значення вимірюваної величини похибки поділяються на адитивні (незалежні від значення вимірюваної величини) та мультиплікативні (пропорційні значенню вимірюваної величини).

Систематичні похибки є найбільш небезпечним типом похибок з точки зору забезпечення якості вимірювань, оскільки вони залишаються незмінними при повторних вимірюваннях і не можуть бути зменшені шляхом збільшення кількості вимірювань, на відміну від випадкових похибок, які зменшуються при усередненні результатів багаторазових вимірювань; систематичні похибки можуть бути постійними (наприклад, похибка калібрування, яка залишається однаковою в усьому діапазоні вимірювань) або змінними (наприклад, температурна похибка, яка залежить від температури навколишнього середовища); змінні систематичні похибки можуть бути прогресуючими

(закономірно зростаючими або спадними в часі, наприклад, похибка, викликана старінням елементів засобу вимірювання) або періодичними (закономірно змінюючимися за певним періодом, наприклад, похибка, викликана обертанням механічних елементів приладу). Для виявлення систематичних похибок використовуються різні методи: метод заміщення (коли вимірювана величина заміщується відомою мірою зі збереженням показань засобу вимірювання), метод протиставлення (коли вимірювана величина та міра діють на засіб порівняння по черзі), метод зміни знаку вимірюваної величини (коли вимірювання проводяться при різних знаках вимірюваної величини, а систематична похибка визначається як половина різниці результатів), та інші спеціальні методи, які дозволяють виявити та оцінити систематичні похибки з достатньою точністю. Після виявлення систематичних похибок їх можна компенсувати шляхом внесення поправок до результатів вимірювань, використання більш точних засобів вимірювання, вдосконалення методу вимірювання або створення сприятливих умов для проведення вимірювань.

Випадкові похибки є неминучим наслідком впливу безлічі малих, неконтрольованих факторів на результат вимірювання, і вони підпорядковуються законам теорії ймовірностей, що дозволяє застосовувати статистичні методи для їх аналізу та оцінки; основні властивості випадкових похибок включають: симетрію (однакова ймовірність появи додатних та від'ємних похибок однакової величини), унімодальність (найбільш ймовірними є малі похибки, а ймовірність великих похибок швидко зменшується з їх зростанням), та компенсацію (при достатньо великій кількості вимірювань сума випадкових похибок прямує до нуля). Для кількісної оцінки випадкових похибок використовуються статистичні характеристики: середнє арифметичне результатів вимірювань (яке при достатній кількості вимірювань наближається до істинного значення вимірюваної величини), середньоквадратичне відхилення (яке характеризує розсіювання результатів вимірювань навколо середнього значення), та середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного (яке характеризує точність оцінки істинного значення за результатами багаторазових вимірювань). Випадкові похибки можуть бути зменшені шляхом збільшення кількості вимірювань та усереднення їх результатів, використання більш точних засобів

вимірювання з меншою власною випадковою похибкою, створення стабільних умов проведення вимірювань для зменшення впливу зовнішніх факторів, та застосування спеціальних методів обробки результатів вимірювань, таких як фільтрація, згладжування або регресійний аналіз.

Результати вимірювань представляють собою кількісну інформацію про значення вимірюваної величини, отриману в результаті вимірювального процесу, і вони повинні бути представлені у формі, яка забезпечує можливість їх використання для подальшого аналізу, прийняття рішень або порівняння з іншими результатами; згідно з сучасними метрологічними вимогами, результат вимірювання повинен включати не лише числове значення вимірюваної величини та її одиницю вимірювання, а й оцінку невизначеності цього результату, яка характеризує інтервал, у межах якого з певною ймовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини. Для одноразових вимірювань результат представляється у вигляді одного числового значення з вказівкою границь допустимої похибки засобу вимірювання або оцінки невизначеності вимірювання; для багаторазових вимірювань результат представляється у вигляді середнього арифметичного значення з вказівкою середньоквадратичного відхилення середнього арифметичного або довірчого інтервалу з вказанням рівня довіри; для непрямих вимірювань результат обчислюється за відомою функціональною залежністю від результатів прямих вимірювань, а його невизначеність оцінюється за правилами поширення невизначеностей. Важливо розуміти, що результат вимірювання не є абсолютно точною характеристикою вимірюваної величини, а є лише оцінкою її значення з певним ступенем невизначеності, тому при інтерпретації результатів вимірювань необхідно враховувати цю невизначеність та не робити висновків, які виходять за межі можливостей вимірювального процесу.

Лекція 8

Ймовірнісна оцінка результатів вимірювань: статистичні методи та розподіли ймовірностей

Ймовірнісна оцінка результатів вимірювань є основним підходом до обробки результатів багаторазових вимірювань, оскільки вона дозволяє кількісно оцінити ступінь достовірності отриманих результатів та визначити інтервали, у межах яких з певною ймовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини; цей підхід базується на тому, що результати вимірювань можна розглядати як реалізації випадкової величини, яка має певний закон розподілу ймовірностей, і для оцінки параметрів цього розподілу можна застосувати методи математичної статистики. Основними задачами ймовірнісної оцінки результатів вимірювань є: оцінка істинного значення вимірюваної величини за результатами багаторазових вимірювань, оцінка точності цієї оцінки, виявлення та виключення грубих похибок (промахів), перевірка гіпотез про наявність систематичних похибок, та побудова довірчих інтервалів для істинного значення вимірюваної величини. Для вирішення цих задач використовуються різні статистичні методи, серед яких найбільш поширеними є методи точкового оцінювання, інтервального оцінювання, перевірки статистичних гіпотез та регресійного аналізу, кожен з яких має свої переваги та обмеження залежно від характеру даних та вимог до точності оцінок.

Точкове оцінювання параметрів розподілу результатів вимірювань полягає у знаходженні однозначних числових значень, які найкращим чином характеризують параметри розподілу (наприклад, математичне сподівання або дисперсію) на основі результатів вибірки; найбільш поширеним методом точкового оцінювання є метод максимальної правдоподібності, який полягає у знаходженні таких значень параметрів, при яких функція правдоподібності (ймовірність отримання даної вибірки при заданих параметрах) досягає максимуму; для нормального розподілу, який є найбільш поширеним у метрологічній практиці, оцінкою математичного сподівання є середнє арифметичне результатів вимірювань, а оцінкою дисперсії — вибіркова дисперсія, обчислена за формулою з поправкою Бесселя (діленням на $n-1$ замість

n , де n — кількість вимірювань). Середнє арифметичне результатів вимірювань є найкращою незміщеною оцінкою істинного значення вимірюваної величини за умови, що результати вимірювань є незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами з нормальним законом розподілу, і воно має мінімальну дисперсію серед всіх лінійних незміщених оцінок; однак середнє арифметичне є чутливим до грубих похибок (промахів), тому перед його обчисленням необхідно провести перевірку результатів вимірювань на наявність промахів та виключити їх з вибірки. Крім середнього арифметичного, для оцінки центру розподілу можуть використовуватися й інші статистики, такі як медіана (значення, яке ділить вибірку на дві рівні частини) або мода (найбільш часто зустрічаюче значення), які є більш стійкими до викидів, але мають більшу дисперсію за середнє арифметичне при нормальному розподілі.

Інтервальне оцінювання параметрів розподілу результатів вимірювань дозволяє визначити інтервали, у межах яких з певною ймовірністю (рівнем довіри) знаходяться істинні значення параметрів розподілу; на відміну від точкового оцінювання, яке дає лише одне числове значення, інтервальне оцінювання враховує невизначеність оцінки та забезпечує можливість кількісної оцінки ступеня довіри до отриманих результатів. Довірчий інтервал для математичного сподівання нормально розподіленої випадкової величини з відомою дисперсією будується за формулою, яка включає середнє арифметичне, квантиль стандартного нормального розподілу (розподілу Гауса) та середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного; якщо дисперсія невідома (що є типовим випадком у метрологічній практиці), то замість квантилі нормального розподілу використовується квантиль розподілу Стюдента з $(n-1)$ ступенями свободи, де n — кількість вимірювань; розподіл Стюдента має більш важкі хвости порівняно з нормальним розподілом, що призводить до більш широких довірчих інтервалів при малих обсягах вибірки, що відображає більшу невизначеність оцінки при недостатній кількості вимірювань. Для дисперсії нормально розподіленої випадкової величини довірчий інтервал будується за допомогою розподілу χ^2 -квадрат з $(n-1)$ ступенями свободи, що дозволяє оцінити точність вимірювань та визначити необхідну кількість вимірювань для досягнення заданої точності.

Розподіли ймовірностей відіграють ключову роль у ймовірнісній оцінці результатів вимірювань, оскільки вони описують закономірності, за якими випадкові похибки розподіляються навколо істинного значення вимірюваної величини; найбільш поширеним розподілом у метрологічній практиці є нормальний розподіл (розподіл Гауса), який характеризується тим, що випадкові похибки виникають під впливом великої кількості малих, незалежних факторів, кожен з яких вносить незначний внесок у загальну похибку; нормальний розподіл має дзвіноподібну форму з максимумом у точці математичного сподівання та симетрично спадає в обидва боки, що відображає властивість симетрії випадкових похибок; для нормального розподілу існують так звані "правила трьох сигм", які стверджують, що ймовірність того, що випадкова похибка не перевищить за модулем одне середньоквадратичне відхилення, становить приблизно 68%, для двох сигм — приблизно 95%, а для трьох сигм — приблизно 99,7%. Крім нормального розподілу, у метрологічній практиці можуть зустрічатися й інші розподіли ймовірностей, такі як рівномірний розподіл (коли всі значення в деякому інтервалі рівноймовірні, що характерно для похибок квантування в цифрових приладах), трикутний розподіл (розподіл Симпсона, який може виникати при сумуванні двох незалежних рівномірно розподілених величин), та розподіл Релея (який характерний для модуля двовимірного вектора з незалежними нормальними компонентами, що може зустрічатися при вимірюванні амплітуди сигналів). Вибір розподілу ймовірностей для опису результатів вимірювань повинен базуватися на аналізі характеру вимірюваного процесу, джерел похибок та результатів статистичної перевірки гіпотез про відповідність емпіричного розподілу теоретичному.

Перевірка статистичних гіпотез є важливим етапом обробки результатів вимірювань, оскільки вона дозволяє об'єктивно оцінити наявність систематичних похибок, відповідність результатів вимірювань припущеному закону розподілу, однорідність декількох вибірок та інші характеристики вимірювального процесу; статистична гіпотеза - це припущення про параметри або властивості розподілу результатів вимірювань, яке перевіряється на основі аналізу вибірових даних; при перевірці гіпотез формулюються нульова гіпотеза (яка зазвичай відповідає відсутності ефекту або відмінності) та альтернативна гіпотеза (яка відповідає

наявності ефекту або відмінності), після чого обчислюється статистика критерію, яка порівнюється з критичним значенням для заданого рівня значущості. Для перевірки наявності систематичної похибки використовується *t*-критерій Стьюдента, який порівнює середнє арифметичне результатів вимірювань з еталонним значенням та визначає, чи є різниця між ними статистично значущою; для перевірки відповідності емпіричного розподілу нормальному розподілу використовуються критерії згоди, такі як критерій Пірсона (хі-квадрат), критерій Колмогорова-Смірнова або критерій Шапіро-Уїлка; для перевірки однорідності двох вибірок використовується критерій Фішера для порівняння дисперсій та *t*-критерій Стьюдента для порівняння середніх значень; для виявлення грубих похибок (промахів) використовуються критерії, такі як критерій Романовського, критерій Діксона або критерій Граббса, які дозволяють об'єктивно визначити, чи є окремі результати вимірювань статистично відмінними від решти вибірки. При застосуванні статистичних критеріїв необхідно враховувати можливість помилок першого роду (відхилення правильної гіпотези) та другого роду (прийняття неправильної гіпотези), тому вибір рівня значущості повинен базуватися на аналізі наслідків можливих помилок у конкретній задачі.

Лекція 9

Ймовірнісна оцінка похибок вимірювань та невизначеність результатів вимірювань

Ймовірнісна оцінка похибок вимірювань є сучасним підходом до кількісної оцінки якості результатів вимірювань, який базується на використанні методів теорії ймовірностей та математичної статистики для оцінки характеристик похибок як випадкових величин; на відміну від класичного підходу, який розглядає похибки як детерміновані величини з відомими границями, ймовірнісний підхід враховує стохастичну природу похибок та дозволяє оцінювати не лише їхні границі, а й повний розподіл ймовірностей, що забезпечує більш повну та об'єктивну характеристику якості вимірювань. Основними характеристиками похибок у рамках ймовірнісного підходу є математичне сподівання похибки (яке характеризує систематичну складову похибки), дисперсія похибки (яка характеризує розсіювання випадкової складової похибки), та функція розподілу ймовірностей похибки (яка повністю описує закономірності зміни похибки); для нормально розподілених похибок достатньо знати лише математичне сподівання та дисперсію, оскільки нормальним розподілом повністю визначається двома параметрами, але для інших розподілів може знадобитися більша кількість параметрів або повна функція розподілу. Ймовірнісна оцінка похибок дозволяє вирішувати такі задачі, як оцінка ймовірності того, що похибка не перевищить задане значення, визначення границь похибки для заданого рівня ймовірності, оцінка впливу різних джерел похибок на загальну похибку вимірювання, та оптимізація вимірювального процесу для досягнення заданої точності при мінімальних витратах ресурсів.

Складові похибки вимірювання можуть бути розділені на систематичні та випадкові компоненти, кожна з яких має свої особливості та методи оцінки; систематична складова похибки характеризується своїм математичним сподіванням, яке може бути оцінене шляхом порівняння результатів вимірювання з еталонними значеннями або за допомогою спеціальних методів виявлення систематичних похибок; після оцінки систематичної складової її можна компенсувати шляхом внесення поправок до результатів вимірювань, що

значно підвищує точність вимірювань; однак повна компенсація систематичної похибки неможлива, оскільки оцінка самої поправки також має певну невизначеність, яка стає додатковим джерелом похибки. Випадкова складова похибки характеризується своєю дисперсією або середньоквадратичним відхиленням, які можуть бути оцінені за результатами багаторазових вимірювань однієї й тієї самої величини в однакових умовах; випадкова складова не може бути компенсована шляхом внесення поправок, але її вплив може бути зменшений шляхом збільшення кількості вимірювань та усереднення їх результатів, оскільки середньоквадратичне відхилення середнього арифметичного зменшується пропорційно квадратному кореню з кількості вимірювань. Загальна похибка вимірювання є сумою систематичної та випадкової складових, і для її оцінки необхідно враховувати обидві компоненти, використовуючи правила поширення похибок для незалежних величин; якщо систематична та випадкова складові є незалежними, то дисперсія загальної похибки дорівнює сумі дисперсій окремих складових, а середньоквадратичне відхилення загальної похибки дорівнює квадратному кореню з цієї суми.

Невизначеність результатів вимірювань є сучасним поняттям, яке поступово замінює традиційне поняття похибки вимірювання у міжнародній метрологічній практиці, оскільки воно більш повно та об'єктивно характеризує якість результатів вимірювань; згідно з Рекомендаціями з вираження невизначеності вимірювання (GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), невизначеність вимірювання визначається як параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, який характеризує розсіювання значень, які могли б бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині; на відміну від похибки, яка є різницею між виміряним та істинним значеннями (причому істинне значення завжди невідоме), невизначеність є кількісною характеристикою неповноти знань про значення вимірюваної величини, яка може бути оцінена на основі доступної інформації. Невизначеність вимірювання включає внески від усіх джерел невизначеності, які впливають на результат вимірювання, включаючи невизначеність засобу вимірювання, невизначеність методу вимірювання, невизначеність впливу зовнішніх умов, невизначеність оператора, невизначеність еталонів та інші фактори; кожен внесок невизначеності може

бути оцінений за типом А (статистичними методами за результатами багаторазових вимірювань) або за типом В (іншими методами, такими як аналіз технічної документації, досвід попередніх вимірювань, дані калібрування тощо). Сумарна стандартна невизначеність обчислюється за правилами поширення невизначеностей, які залежать від функціональної залежності між вимірюваною величиною та вхідними величинами, а розширена невизначеність отримується шляхом множення сумарної стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення, який визначається залежно від рівня довіри та ефективного числа ступенів свободи.

Класифікація невизначеностей за типами А та В дозволяє систематизувати різні джерела невизначеності та вибрати найбільш доцільні методи їх оцінки; невизначеність типу А оцінюється статистичними методами за результатами багаторазових спостережень в умовах повторюваності, тобто коли вимірювання проводяться одним і тим самим методом, одним і тим самим оператором, за допомогою одного й того самого засобу вимірювання, в одному й тому самому місці та за короткий проміжок часу, що забезпечує мінімальну змінність умов вимірювання; для оцінки невизначеності типу А використовуються стандартні методи математичної статистики, такі як обчислення середнього арифметичного, середньоквадратичного відхилення, середньоквадратичного відхилення середнього арифметичного, побудова довірчих інтервалів та інші статистичні процедури. Невизначеність типу В оцінюється іншими методами, коли немає можливості або потреби проводити багаторазові спостереження, або коли джерело невизначеності не може бути оцінене статистично; до методів оцінки невизначеності типу В належать: використання даних калібрування або перевірки засобів вимірювання, аналіз технічної документації на засоби вимірювання, використання довідкових даних про властивості матеріалів або константи, врахування досвіду попередніх вимірювань, використання результатів міжлабораторних порівнянь та інші методи, які дозволяють отримати кількісну оцінку невизначеності на основі доступної інформації. Для оцінки невизначеності типу В необхідно припускати певний закон розподілу ймовірностей для джерела невизначеності (наприклад, нормальний, рівномірний, трикутний), що дозволяє перетворити границі невизначеності на стандартну

невизначеність шляхом ділення на відповідний коефіцієнт (наприклад, для рівномірного розподілу коефіцієнт дорівнює $\sqrt{3}$, для трикутного - $\sqrt{6}$, для нормального - залежить від рівня довіри).

Правила поширення невизначеностей дозволяють обчислити сумарну невизначеність результату вимірювання на основі невизначеностей окремих вхідних величин, які впливають на результат; для функції вимірювання, яка виражає зв'язок між вимірюваною величиною Y та вхідними величинами $X_1, X_2, \dots, X_n$ у вигляді $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, сумарна дисперсія (квадрат сумарної стандартної невизначеності) обчислюється за формулою, яка включає часткові похідні функції f за кожною вхідною величиною (коефіцієнти чутливості) та коваріації між вхідними величинами; якщо вхідні величини є незалежними, то коваріації дорівнюють нулю, і формула спрощується до суми добутків квадратів коефіцієнтів чутливості на дисперсії вхідних величин. Для лінійних функцій вимірювання формула поширення невизначеностей є точною, а для нелінійних функцій вона є наближеною та базується на розкладанні функції в ряд Тейлора з обмеженням до перших похідних; у випадках, коли нелінійність функції вимірювання є значною, або коли розподіли вхідних величин відрізняються від нормального, можуть використовуватися більш складні методи оцінки невизначеності, такі як метод Монте-Карло, який полягає у багаторазовій генерації випадкових значень вхідних величин згідно з їхніми розподілами ймовірностей та обчисленні відповідних значень вимірюваної величини для отримання емпіричного розподілу результату вимірювання. Коефіцієнти чутливості відіграють важливу роль у аналізі невизначеності, оскільки вони показують, наскільки сильно змінюється результат вимірювання при зміні кожної вхідної величини, що дозволяє ідентифікувати найбільш впливові джерела невизначеності та зосередити зусилля на їх зменшенні для підвищення загальної точності вимірювання.

Розширена невизначеність та коефіцієнт охоплення є важливими поняттями для представлення результатів вимірювань у формі, яка забезпечує можливість їх практичного використання для прийняття рішень; розширена невизначеність визначається як добуток сумарної стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення k , який вибирається залежно від бажаного рівня довіри p

та ефективного числа ступенів свободи v_{eff} ; для нормального розподілу коефіцієнт охоплення дорівнює квантилі стандартного нормального розподілу для заданого рівня довіри (наприклад, $k = 1,96$ для $p = 95\%$, $k = 2,58$ для $p = 99\%$), але для малих обсягів вибірки або коли розподіл результатів відрізняється від нормального, використовується розподіл Стюдента з ефективним числом ступенів свободи, яке обчислюється за формулою Велча-Саттертвейта. Ефективне число ступенів свободи v_{eff} враховує внески різних джерел невизначеності з різними числами ступенів свободи та дозволяє визначити коефіцієнт охоплення для розподілу Стюдента, який забезпечує заданий рівень довіри для сумарної невизначеності; чим більше ефективне число ступенів свободи, тим ближчим є розподіл Стюдента до нормального розподілу, і тим меншим є відмінність між коефіцієнтами охоплення для цих розподілів. Результат вимірювання зазвичай представляється у формі $Y = y \pm U$, де y — оцінка вимірюваної величини (наприклад, середнє арифметичне результатів вимірювань), U — розширена невизначеність, а також вказується коефіцієнт охоплення k та рівень довіри p (якщо він відомий); таке представлення результату вимірювання забезпечує можливість оцінки інтервалу, у межах якого з певною ймовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини, що є важливим для прийняття обґрунтованих рішень на основі результатів вимірювань.

Міжнародні стандарти оцінки невизначеності вимірювань, такі як GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), ISO/IEC 17025 (Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій), та інші документи Міжнародної організації з стандартизації (ISO) та Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM), встановлюють єдині підходи до оцінки та представлення невизначеності вимірювань на глобальному рівні, що забезпечує сумісність та порівнянність результатів вимірювань, отриманих у різних країнах та лабораторіях; ці стандарти визначають термінологію, принципи, методи та процедури оцінки невизначеності, а також вимоги до документування результатів вимірювань та їх невизначеності. Впровадження міжнародних стандартів оцінки невизначеності вимірювань є обов'язковим для національних метрологічних інститутів, калібрувальних та випробувальних лабораторій, які

бажають отримати міжнародне визнання своїх результатів, а також для підприємств, які експортують продукцію на міжнародні ринки та повинні підтверджувати відповідність своєї продукції міжнародним стандартам якості та безпеки. Сучасні системи забезпечення якості вимірювань, такі як системи управління якістю відповідно до стандартів серії ISO 9000, системи екологічного менеджменту відповідно до ISO 14000, та системи управління безпекою харчових продуктів відповідно до HACCP, також вимагають оцінки та контролю невизначеності вимірювань як важливого елемента забезпечення достовірності результатів вимірювань, які використовуються для прийняття управлінських рішень. Розвиток методів оцінки невизначеності вимірювань продовжується, і сьогодні активно розробляються нові підходи, такі як байєсівські методи оцінки невизначеності, методи на основі нечіткої логіки, та методи машинного навчання для автоматичної оцінки невизначеності в складних вимірювальних системах, що відкриває нові можливості для підвищення точності та надійності вимірювань у сучасних наукових та інженерних дослідженнях.

Лекція 10

Стандартизація: історичні корені, теоретичні основи та принципи

Стандартизація як система упорядкування технічних, технологічних та організаційних рішень має глибокі історичні корені, що сягають античності, коли перші стандарти виникли як необхідний інструмент для забезпечення сумісності та якості продукції в умовах розвитку ремесел та торгівлі; ще в Стародавньому Вавилоні існували державні еталони мір довжини та маси, закріплені законами царя Хаммурапі, а в Стародавньому Римі стандартизація застосовувалася для виготовлення цегли, яка мала єдині розміри для забезпечення швидкого будівництва фортифікаційних споруд та доріг, що свідчить про розуміння практичної користі уніфікації ще в античну епоху. Серйозного розвитку стандартизація набула у період промислової революції XIX століття, коли масове виробництво створило нагальну потребу в уніфікації деталей, вузлів та технологічних процесів для забезпечення взаємозамінності компонентів, що дозволило організувати конвеєрне виробництво та значно знизити вартість продукції; ключовим моментом став винахід системи допусків і посадок інженером Джозефом Вітвортсом у 1840-х роках, яка встановила єдині правила для виготовлення різьбових з'єднань, що стало основою для сучасної системи геометричних допусків та технічних вимог до продукції. На початку XX століття стандартизація перетворилася з технічного інструменту на стратегічний ресурс економічного розвитку, що знайшло відображення у створенні перших національних організацій зі стандартизації — у 1901 році було засновано Британський інститут стандартів (BSI), у 1918 році — Американське товариство випробування матеріалів (ASTM), а у 1926 році — Національний комітет зі стандартизації Радянського Союзу (в майбутньому Госстандарт СРСР), що свідчить про усвідомлення державами стратегічної важливості стандартизації для промислового розвитку, обороноздатності та міжнародної торгівлі. Міжнародна співпраця у сфері стандартизації розпочалася у 1906 році зі створення Міжнародної електротехнічної комісії (IEC), а у 1947 році була заснована Міжнародна організація зі стандартизації (ISO), яка стала головною

платформою для розробки міжнародних стандартів у неелектротехнічних галузях, що заклало основи сучасної глобальної системи стандартизації, яка сьогодні охоплює майже всі сфери людської діяльності — від технічних характеристик продукції до управління якістю, безпеки, охорони довкілля та соціальної відповідальності бізнесу.

Теоретичні основи стандартизації базуються на комплексі фундаментальних принципів, які визначають мету, завдання та методологію цієї діяльності, а також забезпечують її наукову обґрунтованість та практичну ефективність; згідно з міжнародною термінологією, стандартизація визначається як діяльність з вирішення загальних і повторюваних завдань з метою досягнення оптимального ступеня впорядкування у певній сфері, що полягає у розробці, опублікуванні та застосуванні положень у вигляді стандартів для досягнення загальної користі; це визначення підкреслює три ключові аспекти стандартизації: універсальність (застосування до загальних завдань), повторюваність (можливість багаторазового застосування) та оптимальність (досягнення найкращого балансу між різними інтересами). Основні принципи стандартизації включають: принцип уніфікації, який передбачає зведення різноманітності об'єктів до раціональної кількості типорозмірів, форм або параметрів для забезпечення сумісності та взаємозамінності; принцип типізації, який полягає у розробці типових конструкцій, технологій або процесів на основі найкращих практик; принцип агрегативності, який передбачає створення складних систем зі стандартних, взаємозамінних модулів або агрегатів; принцип оптимальності, який вимагає знаходження найкращого співвідношення між витратами на стандартизацію та економічним ефектом від її застосування; принцип динамічності, який враховує необхідність періодичного оновлення стандартів у зв'язку з науково-технічним прогресом; та принцип відкритості та консенсусу, який забезпечує участі всіх зацікавлених сторін у розробці стандартів та їх добровільне застосування. Теоретична база стандартизації тісно пов'язана з іншими науками — метрологією (через забезпечення єдності вимірювань), кваліметрією (через оцінку якості продукції), економікою (через аналіз ефективності стандартизації), правознавством (через регулювання відносин у сфері стандартизації) та управлінням (через інтеграцію стандартів у системи

управління якістю, безпекою, екологією), що робить стандартизацію міждисциплінарною галуззю знань з власною методологією та інструментарієм.

Об'єкти та предмети стандартизації охоплюють широкий спектр явищ, процесів та продуктів, щодо яких існує потреба в упорядкуванні та встановленні єдиних вимог; об'єктами стандартизації є матеріальні предмети (продукція, матеріали, компоненти), процеси (технологічні, управлінські, сервісні), послуги (транспортні, фінансові, медичні, освітні) та методи (випробування, вимірювання, аналізу); предметами стандартизації є характеристики цих об'єктів, такі як розміри, маса, міцність, надійність, безпека, ергономіка, енергоефективність, екологічність, сумісність, взаємозамінність, а також термінологія, позначення, правила оформлення документації. Стандартизація застосовується на різних рівнях ієрархії — від міжнародного та регіонального до національного, галузевого, підприємницького та навіть міжфірмового, що забезпечує гнучкість системи та можливість врахування специфіки різних сфер діяльності; при цьому стандарти можуть мати різний статус застосування — обов'язкові (у сферах, пов'язаних з безпекою життя і здоров'я людей, охороною навколишнього середовища, захистом споживачів) або добровільні (у більшості технічних та управлінських сфер), що відображає баланс між державним регулюванням та ринковими механізмами. Ефективність стандартизації оцінюється за кількома критеріями: економічним (зниження собівартості продукції, підвищення продуктивності праці, зменшення витрат на розробку та виробництво), соціальним (підвищення безпеки продукції, поліпшення умов праці, забезпечення доступності послуг), науково-технічним (прискорення науково-технічного прогресу, сприяння інноваціям, забезпечення сумісності нових технологій) та екологічним (зниження негативного впливу на довкілля, підвищення ресурсо- та енергоефективності); дослідження показують, що кожен вкладений у розробку стандартів долар приносить економіці від 5 до 20 доларів економічного ефекту, що підтверджує стратегічну важливість стандартизації для національного економічного розвитку.

Розвиток стандартизації у XXI столітті характеризується переходом від вузько технічної діяльності до стратегічного інструменту управління якістю, безпекою, інноваціями та сталістю; сучасна стандартизація охоплює не лише

традиційні технічні характеристики продукції, а й такі сфери, як управління якістю (серія стандартів ISO 9000), управління безпекою праці (серія ISO 45000), екологічний менеджмент (серія ISO 14000), соціальна відповідальність (стандарт ISO 26000), кібербезпека (серія стандартів ISO/IEC 27000), управління ризиками (стандарт ISO 31000), що свідчить про перетворення стандартизації на універсальний інструмент управління організаціями у глобалізованому світі. Особливо важливим став зв'язок стандартизації з інноваційною діяльністю — стандарти сьогодні не заважають інноваціям, а навпаки, створюють платформу для їх поширення, забезпечуючи сумісність нових технологій з існуючими системами та спрощуючи їх комерціалізацію; прикладом є стандартизація інтерфейсів для смартфонів (USB-C), яка дозволила різним виробникам створювати сумісні пристрої та аксесуари, прискоривши інноваційний розвиток у цій галузі. Глобалізація економіки призвела до посилення ролі міжнародних стандартів як "технічного мовлення" між країнами, що сприяє лібералізації міжнародної торгівлі, зниженню технічних бар'єрів та забезпеченню безперервності глобальних ланцюгів поставок; за даними Світової організації торгівлі (СОТ), узгодження національних стандартів з міжнародними дозволяє знизити витрати на експорт на 10–15%, що робить стандартизацію важливим інструментом інтеграції країн у світову економіку. Майбутнє стандартизації пов'язане з цифровізацією — розробкою стандартів для штучного інтелекту, Інтернету речей, блокчейну, квантових технологій, а також створенням "цифрових двійників" стандартів, які будуть інтегровані у програмне забезпечення для автоматичної перевірки відповідності продукції вимогам стандартів на етапі проектування, що кардинально змінить підхід до забезпечення якості та безпеки продукції у цифрову епоху.

Лекція 11

Національна система стандартизації України: структура, документи та організація робіт

Національна система стандартизації України сформувалася в умовах незалежності держави та інтеграції у європейський та глобальний економічний простір, що визначило її основні принципи та структуру; правову основу системи становить Закон України "Про стандартизацію" від 1 червня 2015 року № 315-VIII, який визначає правові, організаційні та економічні засади діяльності у сфері стандартизації, гармонізує національне законодавство з європейськими нормами (Директивою ЄС 98/34/ЄС та Регламентом (ЄС) № 1025/2012) та забезпечує перехід від радянської моделі обов'язкової стандартизації до сучасної моделі, де стандарти є переважно добровільними, а обов'язкові вимоги встановлюються лише у сферах, пов'язаних з безпекою. Згідно з цим законом, національна стандартизація в Україні здійснюється шляхом розробки, прийняття, опублікування, застосування та перегляду національних стандартів (ДСТУ), які розробляються на основі консенсусу зацікавлених сторін — державних органів, підприємств, наукових установ, громадських організацій та споживачів — і приймаються Національним органом стандартизації України, яким є Державне підприємство "Український науково-дослідний і навчальний центр стандартизації, сертифікації та якості" (ДП "УкрНДНЦ"). Система національних стандартів України побудована за модульним принципом і включає кілька категорій нормативних документів, кожна з яких має свій статус, сферу застосування та порядок розробки; центральне місце займають національні стандарти України (ДСТУ), які приймаються на загальнодержавному рівні та застосовуються на всій території країни, але є переважно добровільними для застосування, за винятком випадків, коли їх застосування прямо передбачено законодавством України у сферах безпеки. Крім національних стандартів, до системи входять стандарти галузей економіки (СГ), які розробляються міністерствами та іншими центральними органами виконавчої влади для вирішення специфічних галузевих завдань, стандарти підприємств (СТП), які розробляються самими підприємствами для внутрішніх потреб, та технічні умови

(ТУ), які встановлюють вимоги до конкретної продукції, що випускається підприємством; важливим елементом системи є також стандарти міжнародних та регіональних організацій (ISO, IEC, EN), які приймаються в Україні методом перекладу або методом затвердження оригіналу з внесенням національних відхилень, що забезпечує гармонізацію національних стандартів з міжнародними та європейськими.

Категорії нормативних документів у сфері стандартизації України
Національний стандарт України
Національний стандарт України (гармонізований з EN)
Національний стандарт України (гармонізований з ISO/IEC)
Стандарт галузі
Стандарт підприємства
Технічні умови

Організація робіт зі стандартизації в Україні здійснюється через систему технічних комітетів зі стандартизації (ТК), які є основними робочими органами з розробки національних стандартів; кожен ТК створюється для певної сфери діяльності (наприклад, ТК 1 "Метрологія", ТК 46 "Кібербезпека", ТК 134 "Якість продукції") і включає представників усіх зацікавлених сторін — державних органів, виробників, споживачів, наукових установ, громадських організацій — у пропорції, яка забезпечує баланс інтересів; робота ТК базується на принципах відкритості, прозорості та консенсусу, а всі етапи розробки стандарту (від ідеї до прийняття) супроводжуються публічним обговоренням на офіційному веб-порталі стандартизації. Процес розробки національного стандарту включає кілька обов'язкових етапів: ініціювання розробки (подання пропозиції від зацікавленої сторони), затвердження програми розробки Національним органом, формування робочої групи ТК, розробка проекту стандарту, внутрішнє обговорення в ТК, публічне обговорення (не менше 60 днів), врахування зауважень та пропозицій, затвердження проекту ТК, експертиза проекту Національним органом, прийняття та опублікування стандарту; кожен етап супроводжується документальним оформленням та можливістю участі будь-якої зацікавленої сторони, що забезпечує високу якість та легітимність прийнятих стандартів. Особливістю української системи є механізм "зворотної гармонізації"

— коли національні стандарти, що містять інноваційні рішення, можуть бути запропоновані для включення до міжнародних стандартів через представництво України в технічних комітетах ISO та IEC, що дозволяє українським розробникам впливати на формування глобальних технічних норм та захищати національні інтереси у міжнародній стандартизації.

Державний нагляд за додержанням вимог законодавства у сфері стандартизації здійснюється Державною службою України з питань безпеки харчових продуктів та захисту споживачів (Держспоживслужба) у межах її повноважень, визначених законом; нагляд застосовується лише щодо вимог, що є обов'язковими за законом (наприклад, вимоги щодо безпеки продукції, встановлені технічними регламентами), а не щодо добровільних стандартів, що відповідає європейській практиці розділення технічного регулювання (обов'язкові вимоги) та стандартизації (добровільні стандарти). Ефективність робіт зі стандартизації в Україні оцінюється за кількома показниками: ступенем гармонізації національних стандартів з міжнародними та європейськими (станом на 2026 рік близько 65% національних стандартів гармонізовано з стандартами ISO/IEC та EN), кількістю нових стандартів, прийнятих щороку (близько 500–700), термінами актуалізації чинних стандартів (середній вік стандарту становить 8–10 років, що перевищує рекомендований термін у 5 років), рівнем участі українських експертів у міжнародних робочих групах (близько 300 експертів), та економічним ефектом від застосування стандартів (за оцінками, кожен гривня, вкладена у стандартизацію, приносить економіці 8–12 гривень ефекту). Однією з ключових проблем української системи стандартизації є недостатнє фінансування робіт зі стандартизації, що призводить до застарівання багатьох стандартів, обмеженої участі українських експертів у міжнародних робочих групах та недостатньої інформованості підприємств про можливості застосування стандартів; для вирішення цих проблем у рамках Державної програми розвитку стандартизації на 2024–2027 роки передбачено збільшення фінансування, розширення участі України в міжнародній стандартизації, цифровізацію системи стандартизації (створення єдиного реєстру стандартів з можливістю онлайн-доступу) та посилення взаємодії з бізнесом для підвищення розуміння стратегічної цінності стандартизації для конкурентоспроможності

підприємств.

Міжнародна та регіональна стандартизація є невід'ємною частиною національної системи, оскільки глобалізація економіки робить неможливим існування ізольованих національних систем стандартів; Україна є повноправним членом міжнародних організацій зі стандартизації — Міжнародної організації зі стандартизації (ISO) та Міжнародної електротехнічної комісії (IEC) — і має право голосу на засіданнях Генеральних асамблей цих організацій, а також може ініціювати розробку нових міжнародних стандартів та брати участь у роботі всіх технічних комітетів. У регіональній стандартизації Україна активно взаємодіє з Європейським комітетом зі стандартизації (CEN) та Європейською електротехнічною комісією зі стандартизації (CENELEC) через механізм співпраці, що дозволяє приймати європейські стандарти (EN) як національні стандарти України (ДСТУ EN) без змін або з мінімальними національними відхиленнями, що забезпечує технічну сумісність української продукції з європейськими ринками; цей процес гармонізації є ключовим елементом інтеграції України до європейського економічного простору та виконання вимог Угоди про асоціацію з ЄС. Крім європейської стандартизації, Україна бере участь у роботі регіональних організацій, таких як Міжнародна організація зі стандартизації країн СНД (Міждержстандарт), хоча її роль поступово зменшується на користь європейської та міжнародної стандартизації відповідно до курсу України на євроінтеграцію; також Україна співпрацює з національними організаціями зі стандартизації інших країн (Німеччини, Польщі, Литви тощо) для обміну досвідом та спільної розробки стандартів у галузях, що мають стратегічне значення для регіональної інтеграції. Ефективність участі України в міжнародній стандартизації оцінюється за кількістю прийнятих ініціатив українських експертів, кількістю національних стандартів, гармонізованих з міжнародними, та рівнем впливу українських позицій на зміст міжнародних стандартів; за останні п'ять років кількість українських експертів, які беруть участь у міжнародних робочих групах, збільшилася на 40%, а кількість стандартів ДСТУ ISO/IEC зросла на 25%, що свідчить про посилення ролі України в глобальній стандартизації.

Лекція 12

Сертифікація: сутність, історичний розвиток та сучасні системи

Сертифікація як форма підтвердження відповідності продукції, процесів або послуг встановленим вимогам має давню історію, яка сягає корінням у середньовічні цехи ремісників, де майстри ставили особистий знак на вироблені вироби як гарантію їхньої якості та відповідності цеховим стандартам; цей знак був першою формою сертифікації, оскільки він підтверджував, що виріб виготовлений кваліфікованим майстром за встановленими правилами та має гарантовану якість, а порушення цих правил каралося виключенням з цеху та втратою права на заняття ремеслом. Систематичний розвиток сертифікації почався у другій половині XIX століття з появою перших організацій з підтвердження відповідності - у 1894 році в Німеччині було створено організацію VDE (Verband der Elektrotechnik), яка займалася перевіркою електротехнічних виробів на безпеку, а у 1903 році в Великій Британії був введений знак якості BSI Kitemark для підтвердження відповідності продукції стандартам Британського інституту стандартів; ці події ознаменували перехід від особистої відповідальності майстра до інституційного механізму підтвердження якості, що стало основою сучасної системи сертифікації. У першій половині XX століття сертифікація поступово перетворилася з добровільного механізму на обов'язковий інструмент державного регулювання у сферах, пов'язаних з безпекою - у 1938 році в США був прийнятий Закон про харчові продукти, ліки та косметику, який встановив обов'язкову сертифікацію лікарських засобів, а після Другої світової війни багато країн Європи ввели обов'язкову сертифікацію електропобутової техніки, будівельних матеріалів та інших продуктів, що становлять потенційну загрозу для життя та здоров'я споживачів. Друга половина XX століття ознаменувалася глобалізацією сертифікації - у 1970-х роках були створені міжнародні системи сертифікації, такі як система сертифікації якості IQNet, система сертифікації електрообладнання IECEx CB Scheme, а у 1987 році була опублікована перша версія стандарту ISO 9001, яка започаткувала глобальний рух з сертифікації систем управління якістю, що змінило саму

сутність сертифікації — вона перестала бути лише інструментом підтвердження відповідності продукції та перетворилася на інструмент управління організаціями.

Сутність сертифікації полягає у наданні незалежної гарантії того, що продукція, процес або послуга відповідають встановленим вимогам, які можуть бути визначені стандартами, технічними регламентами, контрактами або іншими нормативними документами; сертифікація є добровільною або обов'язковою залежно від сфери застосування та законодавчих вимог конкретної країни - обов'язкова сертифікація застосовується до продукції, що становить підвищений ризик для безпеки (електрообладнання, дитячі іграшки, медичні вироби, харчові продукти), тоді як добровільна сертифікація використовується для підвищення конкурентоспроможності продукції, підтвердження додаткових характеристик (екологічності, енергоефективності) або відповідності систем управління міжнародним стандартам. Процес сертифікації включає кілька обов'язкових етапів: подання заяви в орган з сертифікації, аналіз документації (технічних описів, результатів власних випробувань, сертифікатів на компоненти), проведення випробувань зразків продукції в акредитованій лабораторії, оцінка виробництва (для серійної продукції), прийняття рішення про видачу сертифіката, видача сертифіката та знака відповідності, а також інспекційний нагляд за дотриманням вимог після сертифікації; кожен етап супроводжується документальним оформленням та може бути оскаржений заявником у встановленому порядку. Органи з сертифікації повинні бути акредитовані національним органом акредитації (в Україні — Національним агентством акредитації України, НААУ) відповідно до вимог стандарту ISO/IEC 17065, що гарантує їхню компетентність, незалежність та об'єктивність; акредитація органів сертифікації є ключовим механізмом забезпечення довіри до результатів сертифікації як на національному, так і на міжнародному рівні, оскільки лише акредитовані органи мають право проводити сертифікацію продукції, що підлягає обов'язковій оцінці відповідності.

Сучасні системи сертифікації можна класифікувати за кількома ознаками: за об'єктом сертифікації (сертифікація продукції, сертифікація систем управління, сертифікація персоналу, сертифікація послуг), за статусом

застосування (обов'язкова та добровільна), за рівнем дії (міжнародна, регіональна, національна, галузева), та за організаційною формою (державні системи, приватні системи, громадські системи); найбільш поширеними є системи сертифікації продукції (наприклад, європейська система СЕ, українська система УкрСЕПРО) та системи сертифікації систем управління (серія стандартів ISO 9001 для якості, ISO 14001 для екології, ISO 45001 для безпеки праці, ISO/IEC 27001 для інформаційної безпеки). Міжнародна співпраця в сфері сертифікації забезпечується через угоди про взаємне визнання результатів сертифікації (Multilateral Recognition Arrangements, MRA) між національними органами акредитації, що дозволяє сертифікатам, виданим в одній країні, визнаватися в інших країнах без повторної сертифікації; Україна є учасником таких угод через членство НААУ в Міжнародній коаліції акредитації (IAF) та Європейській співдружності акредитації (EA), що забезпечує міжнародне визнання українських сертифікатів у понад 100 країнах світу. Особливістю сучасної сертифікації є її інтеграція з цифровими технологіями - розробка електронних сертифікатів з криптографічним захистом, створення реєстрів сертифікатів з можливістю онлайн-перевірки їхньої дійсності, впровадження блокчейну для забезпечення незмінності даних про сертифікацію, що підвищує прозорість системи та захищає споживачів від підроблених сертифікатів; у 2025 році в Україні було запроваджено єдиний державний реєстр сертифікатів відповідності з можливістю миттєвої перевірки їхньої дійсності через мобільний додаток, що стало важливим кроком у боротьбі з контрафактною продукцією та підвищенні довіри споживачів до сертифікованої продукції.

Державний нагляд за додержанням вимог законодавства у сфері сертифікації в Україні здійснюється Держспоживслужбою та іншими уповноваженими органами залежно від сфери діяльності (наприклад, Державна служба України з лікарських засобів для фармацевтичної продукції); нагляд включає перевірку наявності сертифікатів відповідності для продукції, що підлягає обов'язковій сертифікації, перевірку дійсності сертифікатів, перевірку правильності застосування знаків відповідності, та перевірку дотримання вимог сертифікації під час інспекційного нагляду; порушення вимог сертифікації караються адміністративною відповідальністю (штрафи) або кримінальною

відповідальністю у випадках, що спричинили шкоду здоров'ю споживачів. Ефективність сертифікації як інструменту забезпечення якості та безпеки оцінюється за кількістю виявлених порушень під час нагляду, кількістю відкликаних сертифікатів через невідповідність продукції, кількістю інцидентів, пов'язаних з сертифікованою продукцією, та рівнем довіри споживачів до знаків відповідності; дослідження показують, що продукція, що пройшла обов'язкову сертифікацію, має на 60–70% менше випадків виявлення критичних дефектів порівняно з несертифікованою продукцією, що підтверджує соціальну цінність сертифікації як інструменту захисту прав споживачів. Майбутнє сертифікації пов'язане з її трансформацією від разової процедури до неперервного процесу моніторингу відповідності за допомогою інтернету речей (IoT) - коли датчики, вбудовані в продукцію, будуть постійно передавати дані про її стан та відповідність вимогам, що дозволить автоматично припиняти дію сертифіката при виявленні відхилень; також очікується посилення ролі сертифікації у підтвердження сталого розвитку (сертифікація вуглецевого сліду, циркулярної економіки, соціальної відповідальності), що відповідає глобальним трендам переходу до "зеленої" економіки та відповідальності бізнесу перед суспільством.

Лекція 13

Управління якістю та кваліметрія: теоретичні основи, методи та перспективи розвитку

Управління якістю як система організаційної діяльності спрямована на забезпечення відповідності продукції, процесів та послуг вимогам споживачів та інших зацікавлених сторін через планомірне застосування принципів, методів та інструментів, що дозволяють досягати стабільно високих результатів та постійне вдосконалення; історично управління якістю пройшло кілька етапів розвитку - від інспекційного контролю якості на виході виробництва (1920–1940 роки), через статистичний контроль процесів (1940–1960 роки), до загального управління якістю (TQM) та управління якістю на основі процесного підходу (1980–2000 роки), і сьогодні перебуває на етапі інтеграції якості з інноваціями, сталістю та цифровізацією. Сучасне управління якістю базується на семи фундаментальних принципах, визначених стандартом ISO 9000:2015 - орієнтація на клієнта (розуміння та задоволення потреб споживачів як основна мета організації), лідерство (створення єдиної мети та напрямку діяльності керівництвом організації), залученість людей (створення умов для повноцінної участі всіх працівників у досягненні цілей якості), процесний підхід (розгляд діяльності як взаємопов'язаних процесів для досягнення передбачуваних результатів), поліпшення (постійне прагнення до вдосконалення продукції, процесів та систем управління), прийняття рішень на основі фактів (використання аналізу даних та інформації для обґрунтованого управління), та менеджмент взаємовигідних відносин з постачальниками (створення партнерських відносин для підвищення здатності обох сторін до створення цінності). Ці принципи реалізуються через систему управління якістю (СУЯ), яка визначається стандартом ISO 9001 як набір взаємопов'язаних процесів управління та діяльності з використанням ресурсів для встановлення політики та цілей якості та досягнення цих цілей; СУЯ включає такі ключові елементи: контекст організації (аналіз внутрішніх та зовнішніх чинників, ідентифікація зацікавлених сторін), лідерство (політика якості, організаційні ролі та

повноваження), планування (ризиків та можливостей, цілі якості), підтримка (ресурси, компетентність, усвідомленість, комунікація, документована інформація), операційна діяльність (планування та контроль процесів, вимоги до продукції), оцінка результативності (моніторинг, вимірювання, аналіз, аудит, огляд керівництва), та поліпшення (неконформності, корективні дії, постійне вдосконалення).

Основні положення кваліметрії базуються на тому, що якість є багатовимірною характеристикою, яка може бути описана сукупністю показників якості, кожен з яких характеризує певний аспект властивостей продукції (призначення, надійність, ергономіка, естетика, стандартизація та уніфікація, патентна чистота, екологічність); для кількісної оцінки якості використовуються індекси якості, які визначаються як відношення фактичного значення показника якості до базового значення (значення показника для зразка-еталона або для попереднього зразка), а загальний показник якості обчислюється як середньозважене індексів окремих показників з урахуванням їхньої відносної ваги. Методи кваліметрії включають: метод експертних оцінок (для визначення вагомості показників якості), метод базового зразка (порівняння з еталонним виробом), метод диференційних показників (окрема оцінка кожного показника якості), метод комплексних показників (узагальнена оцінка якості), метод бальних оцінок (перетворення якісних характеристик у кількісні бали); ці методи широко застосовуються у практиці приймальних випробувань, конкурентного аналізу, розробки нової продукції та маркетингових досліджень. Кваліметрія тісно пов'язана з іншими науками - метрологією (через забезпечення точності вимірювань показників якості), стандартизацією (через встановлення нормативних значень показників якості), економікою (через оцінку економічної ефективності підвищення якості), та маркетингом (через дослідження сприйняття якості споживачами), що робить її міждисциплінарною галуззю знань з власною методологією та інструментарієм.

Сучасні методи управління якістю включають широкий спектр інструментів, які можна класифікувати за рівнем складності та призначенням; до базових інструментів належать: контрольні карти (для моніторингу стабільності процесів), діаграма Парето (для ідентифікації ключових проблем за принципом

80/20), діаграма Ішикави (риб'ячий скелет, для аналізу причин проблем), гістограма (для візуалізації розподілу даних), діаграма розсіювання (для аналізу зв'язку між змінними), чек-лист (для систематичного збору даних), та діаграма змін (для відстеження тенденцій у часі) - ці сім інструментів, запропонованих Каору Ішикавою, є основою для більшості систем управління якістю. До сучасних методів належать: шість сигм (6σ) - методологія зменшення варіацій у процесах до рівня 3,4 дефекту на мільйон можливостей, яка використовує цикл DMAIC (визначення, вимірювання, аналіз, вдосконалення, контролювання); бережливе виробництво (Lean) - підхід до усунення втрат у процесах для максимізації цінності для клієнта; тотальне продуктивне обслуговування (TPM) - система підтримки обладнання для максимізації його ефективності; кайдзен - філософія постійного вдосконалення через малі, поступові зміни; та дизайн для шість сигм (DFSS) - методологія проектування продукції та процесів з урахуванням вимог якості з самого початку. Цифровізація управління якістю призвела до появи нових інструментів — систем управління якістю на основі хмарних технологій (QMS у хмарі), платформ для аналітики якості на основі великих даних (Big Data Analytics for Quality), систем моніторингу якості в реальному часі на основі інтернету речей (IoT for Quality Monitoring), та інструментів прогнозової аналітики якості на основі штучного інтелекту (AI for Predictive Quality); ці технології дозволяють переходити від реактивного управління якістю (виправлення дефектів після їх виникнення) до проактивного (передбачення та запобігання дефектам до їх виникнення), що кардинально підвищує ефективність систем управління якістю.

Ефективність управління якістю оцінюється за кількома групами показників: показники якості продукції (частка браку, кількість рекламацій, індекс задоволеності клієнтів), показники ефективності процесів (цикл повного виконання замовлення, продуктивність, витрати на якість), показники економічної ефективності (зниження витрат на усунення дефектів, підвищення рентабельності, зростання частки ринку), та показники соціальної ефективності (покращення умов праці, зниження травматизму, підвищення задоволеності персоналу); дослідження показують, що організації, які ефективно впроваджують системи управління якістю, мають на 20–30% нижчі витрати на якість, на 15–25%

вищу продуктивність праці та на 10–20% вищий рівень задоволеності клієнтів порівняно з організаціями без системного підходу до управління якістю. Майбутнє управління якістю пов'язане з його інтеграцією з іншими системами управління (екологією, безпекою, соціальною відповідальністю) в єдину систему сталого розвитку, де якість розуміється не лише як відповідність продукції вимогам споживачів, а й як внесок у сталість суспільства та довкілля; також очікується посилення ролі особистої відповідальності кожного працівника за якість результатів своєї діяльності через впровадження культури якості, де якість стає частиною корпоративних цінностей та повсякденної практики кожного співробітника. Кваліметрія як наука продовжує розвиватися в напрямку розробки нових методів оцінки якості нематеріальних об'єктів (послуг, цифрових продуктів, досвіду користувача), інтеграції суб'єктивних оцінок споживачів з об'єктивними показниками через методи нейромаркетингу та аналізу емоцій, а також розробки універсальних моделей оцінки якості для нових технологій (штучного інтелекту, робототехніки, біотехнологій), що забезпечить наукову основу для управління якістю в епоху цифрової трансформації та інновацій.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Метрологія, стандартизація та управління якістю : навч. посіб. / Л. П. Клименко, Л. В. Пізінцалі, Н. І. Александровська, В. Д. Євдокимов. Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 243 с.

2. Основи метрології: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: П. О. Дем'яненко, Ю. Ф. Зінковський. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 237 с.

3. Метрологія, стандартизація і сертифікація : підручник / В. В. Тарасова, С. Малиновський, М. Ф. Рибак ; за заг. ред. В. В. Тарасової. Київ : Центр навчальної літератури, 2006. 264 с.

4. Основи стандартизації, сертифікації та управління якістю : конспект лекцій. / І.І. Федченко – Харків : УкрДУЗТ, 2020. – 66 с..

5. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; За ред. проф. Є. С. Поліщука. – Львів.: Видавництво «Бескід Біт» , 2003. – 544 с.

6. Токар Ю.С., Караван Ю.В. Основи стандартизації, метрології та сертифікації: Посібник. – Львів, ЛНУ ім. Івана Франка, 2002. – 247 с.

7. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко Вид-во ВНТУ, 2012. 521 с.

8. Цюцюра С. В., Цюцюра В. Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація : навч. посіб. Вид. 3-тє, стер. Київ : Знання, 2006. 242 с. (Вища освіта ХХІ століття).