

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ інфокомунікацій _____
(повна назва)

Кафедра _____ інформаційно-вимірювальних технологій _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Методи та засоби визначення довжини на основі нової системи SI
(тема)

Виконав: здобувач 2 року навчання, групи ЗЯМ-24-1

Носик А.О.

Спеціальність 175-Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва спеціальності)


Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ «Забезпечення якості» _____
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Склярів В.В. _____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри



(підпис)

Захаров І.П.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ інфокомунікацій _____

(повна назва)

Кафедра _____ інформаційно-вимірювальних технологій _____

(повна назва)

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 175 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка _____

(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ «Забезпечення якості» _____

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____ 

(підпис)

«20» 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві

Носику Артему Олександровичу

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Методи та засоби визначення довжини на основі нової системи SI _____

затверджена наказом по університету від «07» 11 2025 р. № 1011 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 20.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи : еталон довжини на основі нового визначення метра. Нормативне забезпечення: Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»; Постанова КМУ від 17.06.2015 р. №398 «Порядок та критерії надання еталонам статусу національних еталонів». Технічні засоби та технології: державному первинному еталоні України ДЕТУ 01-03-98. Програмне забезпечення: ПК з ОС Windows.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1. Вступ. 4.2. Історичні передумови та становлення метричної системи. Нова SI. 4.3. Еволюція еталону довжини. Сучасна фізика вимірювання довжини. Структура єдиного еталону часу-частоти-довжини. 4.4. Державний первинний еталон одиниці довжини України та передавання розміру одиниці довжини). 4.5. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Слайди презентації кваліфікаційної роботи


6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	проф. Склярів.В.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури, нормативної бази та стану проблеми	17.11.2025	
2	Історичні передумови та становлення метричної системи. Нова SI.	20.11.2025	
3	Еволюція еталону довжини. Сучасна фізика вимірювання довжини. Структура єдиного еталону часу-частоти-довжини.	24.11.2025	
4	Державний первинний еталон одиниці довжини України та передавання розміру одиниці довжини.	27.11.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки	08.12.2025	
6	Підготовка графічного матеріалу та презентації	10.12.2025	
7	Представлення на рецензування	16.12.2025	
8	Представлення роботи в ЕК	18.12.2025	

Дата видачі завдання 07 11 2025 р.

Студент  _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи магістра: 41 с., 8 рис.,
1 табл., 29 джерел.

Ключові слова: ДОВЖИНА, МЕТР, ЕТАЛОН, СИСТЕМА SI.

Об'єкт дослідження – еталон довжини.

Актуальність теми обумовлюється переходом до нанотехнологій, прецизійного приладобудування та глобальної цифровізації виробничих процесів. Зазначені тенденції висувають принципово нові вимоги до точності вимірювання фізичних величин, зокрема довжини, яка є однією з найбільш розповсюджених вимірюваних величин у промисловості та наукових дослідженнях. Традиційні методики поступаються місцем квантово-оптичним методам, де точність лінійних вимірювань стає прямо залежною від точності вимірювання часу та частоти. Впровадження лазерних інтерферометрів, стабілізованих за частотою поглинання в йоді, та використання технології оптичних частотних гребінок (optical frequency combs) стає стандартом не лише для первинних еталонів, а й для високоточних промислових вимірювань.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати еволюцію еталонів довжини та виявити недоліки речових артефактів, що призвели до реформи системи SI у 2019 році.
2. Розкрити фізичну сутність та методичні основи визначення метра через фіксацію швидкості світла у вакуумі та вимірювання частоти електромагнітного випромінювання.
3. Систематизувати та порівняти сучасні засоби відтворення одиниці довжини, зокрема стабілізовані лазери та оптичні частотні гребінки, за критеріями точності та стабільності.
4. Дослідити ієрархічні схеми метрологічної простежуваності, що забезпечують передачу розміру одиниці від державного еталона до промислових засобів вимірювальної техніки (КВМ, лазерні трекери).

5. Оцінити вплив основних джерел невизначеності (зокрема, параметрів навколишнього середовища) на точність відтворення довжини та навести методику розрахунку бюджету невизначеності.

Об'єкт дослідження – процеси вимірювання та відтворення лінійних розмірів у сучасній метрології та високотехнологічному виробництві.

Предмет дослідження – методи реалізації визначення метра через фундаментальні фізичні константи та технічні засоби забезпечення єдності вимірювань в рамках оновленої системи SI.

Методи дослідження.

У роботі використано методи системного аналізу (для дослідження еволюції системи SI та нормативної документації), методи порівняльного аналізу (для оцінки технічних характеристик засобів вимірювання), методи математичного моделювання та статистики (для розрахунку бюджетів невизначеності та оцінки впливу зовнішніх факторів за формулою Едлена).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у:

подальшому розвитку системного підходу до аналізу ієрархічних схем передачі розміру одиниці довжини, що враховує сучасні рекомендації ВІРМ (Mise en pratique) для нанометрології;

узагальненні критеріїв вибору засобів вимірювальної техніки для промислових підприємств залежно від необхідного рівня точності та умов експлуатації в контексті нової дефініції метра.

Результати роботи, зокрема методика оцінки невизначеності лазерних вимірювань з урахуванням параметрів атмосфери, можуть бути використані в діяльності калібрувальних лабораторій для підвищення достовірності вимірювань. Сформульовані рекомендації щодо застосування оптичних методів вимірювання є корисними при модернізації парку вимірювального обладнання промислових підприємств.

ABSTRACT

Explanatory note of the master's qualification paper: 41 pp., 8 figs., 1 table, 29 refs.

Keywords: LENGTH, METER, MEASUREMENT STANDARD, SI SYSTEM.

Object of study – the length standard.

The relevance of the topic is driven by the transition to nanotechnology, precision instrument engineering, and the global digitalization of manufacturing processes. These trends impose fundamentally new requirements on the accuracy of measuring physical quantities, particularly length, which is one of the most common measured quantities in industry and scientific research. Traditional methodologies are giving way to quantum-optical methods, where linear measurement accuracy becomes directly dependent on the accuracy of time and frequency measurement. The implementation of laser interferometers stabilized by absorption frequency in iodine, and the use of optical frequency comb technology, is becoming the standard not only for primary standards but also for high-precision industrial measurements.

To achieve the set goal, the following tasks must be solved:

1. Analyze the evolution of length standards and identify the shortcomings of material artifacts that led to the SI reform in 2019.
2. Reveal the physical essence and methodological foundations of defining the meter through fixing the speed of light in a vacuum and measuring the frequency of electromagnetic radiation.
3. Systematize and compare modern means of reproducing the unit of length, specifically stabilized lasers and optical frequency combs, based on accuracy and stability criteria.
4. Investigate hierarchical schemes of metrological traceability that ensure the transfer of the unit size from the state standard to industrial measuring instruments (CMMs, laser trackers).

5. Evaluate the influence of main sources of uncertainty (specifically, environmental parameters) on the accuracy of length reproduction and present a methodology for calculating the uncertainty budget. The object of study is the processes of measuring and reproducing linear dimensions in modern metrology and high-tech manufacturing.

The subject of study is the methods of implementing the definition of the meter through fundamental physical constants and technical means of ensuring the uniformity of measurements within the framework of the updated SI system.

Research methods. The work employs methods of system analysis (to study the evolution of the SI system and regulatory documentation), comparative analysis methods (to evaluate the technical characteristics of measuring instruments), and mathematical modeling and statistical methods (to calculate uncertainty budgets and assess the impact of external factors using the Edlén formula).

The scientific novelty of the obtained results lies in:

- the further development of a systematic approach to analyzing hierarchical schemes for transferring the length unit size, considering modern BIPM recommendations (*Mise en pratique*) for nanometrology;
- the generalization of criteria for selecting measuring instruments for industrial enterprises depending on the required accuracy level and operating conditions in the context of the new meter definition.

The results of the work, particularly the methodology for evaluating laser measurement uncertainty taking into account atmospheric parameters, can be used in the activities of calibration laboratories to increase measurement reliability. The formulated recommendations regarding the application of optical measurement methods are useful for modernizing the fleet of measuring equipment at industrial enterprises.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ЕВОЛЮЦІЯ МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ (SI): ВІД ХАОСУ ДО КВАНТОВОГО ПОРЯДКУ.....	11
1.1. Історичні передумови та становлення метричної системи	11
1.2. Формування та розвиток системи SI (1960–2018)	13
1.3. Революційна ревізія системи SI 2018–2019 років	15
РОЗДІЛ 2. ЕВОЛЮЦІЯ ЕТАЛОНУ ДОВЖИНИ: ВІД МАЯТНИКА ДО ШВИДКОСТІ СВІТЛА	18
2.1. Гравітаційна концепція (1790 рік)	18
2.2. Геодезичний етап та "Метр Архіву" (1791–1799 роки)	19
2.3. Матеріальний Міжнародний прототип (1889–1960 роки)	20
2.4. Оптичний етап: Криптон-86 (1960–1983 роки)	22
2.5. Фіксація швидкості світла (з 1983 року)	24
РОЗДІЛ 3. СУЧАСНА ФІЗИКА ВИМІРЮВАННЯ ДОВЖИНИ ТА "НОВА SI"	27
3.1. Структура єдиного еталону часу-частоти-довжини	27
3.2. Принцип лазерної інтерферометрії	31
3.3. Вплив показника заломлення повітря та компенсація похибок (Формула Едлена)	31
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЕТАЛОНУ В УКРАЇНІ.	34
4.1 Державний первинний еталон одиниці довжини (ДЕТУ 01-03-98)	34
4.2 Система вторинних еталонів та ієрархія простежуваності	35
4.3 Геодезія та картографія: Яворівський науковий полігон	36
4.4 Авіабудування та аерокосмічна галузь	36
4.5 Важке машинобудування та металургія	37
4.6 Нанотехнології	37
Висновок	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40

ВСТУП

Вимірювання довжини є одним із найдавніших та найбільш фундаментальних завдань людства, що супроводжує розвиток цивілізації від етапу примітивних обмінів до епохи нанотехнологій та космічних досліджень. Протягом століть метрологія еволюціонувала від використання антропометричних даних і локальних речових еталонів до визначень, що базуються на універсальних та незмінних законах фізики.

Ключовим етапом у цьому розвитку стала фундаментальна ревізія Міжнародної системи одиниць (SI), яка набрала чинності у 2019 році. Ця реформа остаточно змінила філософію вимірювань, відмовившись від останніх фізичних артефактів на користь фундаментальних фізичних констант. Сьогодні метр більше не є самостійною величиною, представленою платиновим бруском; він жорстко пов'язаний із фіксованим числовим значенням швидкості світла у вакуумі та визначенням секунди. Це перетворило вимірювання довжини на похідну від вимірювання частоти та часу.

Актуальність теми зумовлена тим, що перехід на нову систему SI вимагає впровадження принципово нових методів та засобів вимірювальної техніки. Сучасна реалізація метра неможлива без використання прецизійних лазерних інтерферометрів, оптичних частотних гребінців (frequency combs) та атомних стандартів частоти. Ці технології дозволяють досягати точності на рівні нанометрів, що є критично важливим для мікроелектроніки, прецизійного машинобудування та фундаментальної науки.

Метою даної роботи є аналіз сучасних методів визначення довжини в контексті нової системи SI, розгляд еволюції еталонної бази від «Метра Архіву» до квантових стандартів, а також дослідження технічних засобів, що забезпечують єдність вимірювань на сучасному етапі.

РОЗДІЛ 1. ЕВОЛЮЦІЯ МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ (SI): ВІД ХАОСУ ДО КВАНТОВОГО ПОРЯДКУ

1.1. Історичні передумови та становлення метричної системи

Історія вимірювань — це не лише історія чисел, це історія розвитку людської цивілізації. Проте, якщо ми глянемо на світ до кінця XVIII століття, ми побачимо картину, котру історики називають «метрологічним хаосом». Уявіть собі ситуацію, коли ви купуєте сукно в одному місті, а продаєте його в сусідньому, і раптом виявляється, що довжина вашого товару змінилася. Чому? Тому що місцевий «лікоть» чи «фут» там коротший.

У дореволюційній Європі існувало понад 250 000 різних одиниць вимірювання. Це був час «метрологічного феодалізму». Кожен феодал, кожне місто і навіть кожен цех могли встановлювати свої власні еталони. Це створювало ґрунт для колосальних зловживань: землевласники використовували «довші» міри, щоб збирати податки зерном, і «коротші» — щоб виплачувати заробітну плату. Брак єдиної мови величин не лише гальмував торгівлю, а й унеможлиблював обмін науковими знаннями. Промислова революція, що насувалася, вимагала точності, яку старі антропометричні міри (базовані на розмірах рук чи ніг) просто не могли забезпечити.

Розв'язок прийшов з епохою Просвітництва та Французькою революцією. Науковці того часу, такі як Лагранж, Лаплас і Кондорсе, керувалися ідеєю раціоналізму. Вони прагнули створити систему, яка б не належала жодному королю чи державі. Їхньою метою було знайти «натуральну міру» — еталон, узятий із самої природи.

У 1790 році було ухвалено історичне рішення: відмовитися від суб'єктивних людських мірок на користь планетарних масштабів. Нова одиниця — метр — була визначена як одна десятимільйонна частина віддалі від Північного полюса до екватора.

Але визначити метр на папері було легко, а виміряти його в реальності — ні. Для цього астрономи Жан-Батист Деламбр та П'єр Мешен вирушили в героїчну експедицію, щоб виміряти дугу меридіана від Дюнкерка на півночі Франції до Барселони в Іспанії. Це завдання тривало сім років (1792–1798) і перетворилося на справжній трилер. Науковці працювали в умовах революційного терору та війни. Їх заарештовували як шпигунів, їхні вимірювальні вежі руйнували, вони хворіли на малярію і голодували.

Більше того, ця історія має свою драматичну таємницю. П'єр Мешен, вимірюючи південну частину в Іспанії, припустився помилки в розрахунках широти Барселони. Усвідомивши неточність, він ледь не збожеволів від сорому і приховав ці дані. Ця «помилка Мешена» (котра складає приблизно 0,2 мм) була закладена в перший фізичний еталон метра. Тобто, перший метр був трохи коротшим за справжню "природну" величину, але саме він став законом.

У 1799 році революційна ідея втілилася в метал: було створено платиновий еталон метра (Mètre des Archives) та еталон кілограма.



Рисунок 1.1 – Платиновий еталон метра у вигляді бруска.

Це була система, побудована на трьох засадах: природність, десятковість (що спрощувало розрахунки) та універсальність. Гаслом системи стали слова: «Для всіх часів, для всіх народів». Однак світ не одразу прийняв нововведення. Знадобилося майже століття, щоб економічна потреба переважила традиції. Кульмінацією цього процесу стало підписання Метричної конвенції 20 травня 1875 року. Створення Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM) перетворило французький винахід на глобальну систему SI, якою ми користуємося сьогодні.

Отже, людство пройшло шлях від хаосу тисяч локальних мір до єдиного платиного бруска, що зберігався у сейфі під Парижем. Це був триумф науки XIX століття. Але, як ми побачимо далі, навіть платина не є вічною. Матеріальні артефакти дряпаються, окислюються і змінюються. Щоб досягти ідеальної точності, науці довелося зробити наступний крок — відмовитися від фізичних предметів і перейти до фундаментальних законів квантової фізики.

1.2. Формування та розвиток системи SI (1960–2018)

Коли 1875 рік був часом зародження сучасної метрології, то 1960 рік став моментом її зрілості. Світ змінився: наука підкорила космос, виникли лазери та атомна енергетика. Застаріла метрична система, орієнтована на торгівлю тканинами та зерном уже не справлялася з фізикою високих енергій. Саме з цієї причини у 1960 році на 11-й Генеральній нараді з мір і ваг було ухвалено знаменне рішення: сформувати єдину, цілісну структуру, що одержала назву *Système International d'Unités*, або скорочено — SI. Було закріплено шість головних одиниць (метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, кандела), до яких згодом (у 1971 році) долучили моль. Це була мить, коли метрологія перетворилася насправді світову мову знань.

Оскільки наша робота зосереджена на вимірюванні відстані, розглянемо розвиток метра докладніше, адже він був найбільш динамічним. Платиновий прут 1799 року, про який ми згадували раніше, мав значний недолік: його

неможливо було відновити у разі руйнування, і він мав обмежену точність. У 1960 році науковці вперше залишили «палицю» заради атомної фізики. Метр визначили як певну кількість довжин хвиль випромінювання помаранчевої лінії ізотопу криптону-86. Але прогрес рухався стрімкіше за нормативи. З винаходом стабільних лазерів криптоновий зразок застарів уже за два десятиліття. І тут відбувся справжній філософський злам. У 1983 році метрологи постановили: досить коригувати зразки відстаней. Зафіксуймо швидкість світла! Швидкість світла у вакуумі (с) була взята як точна константа: 299792458м/с . З цього часу метр перестав бути незалежною величиною. Він став виводитися із секунди. Метр – це просто проміжок, який долає світло за крихітну частину секунди. Це визначення чинне й досі, забезпечуючи неймовірну точність для GPS та космічного орієнтування.

Проте в системі SI жевріла одна «мінусова проблема» — кілограм. До початку XXI століття кілограм лишався єдиною одиницею, що визначалася фізичним об'єктом — циліндром із платино-іридієвого сплаву, який зберігався під трьома скляними ковпаками у сховищі у Севрі (Франція). Його іменували Le Grand K («Великий К»). Проблема полягала в тому, що він «схуд». Регулярні порівняння з копіями показали, що за сторіччя еталон втратив (або його копії здобули) приблизно 50 мікрограмів. Це вага однієї піщинки або відбитка пальця. Здається, несуттєво? Але для сучасної фармакології чи мікроелектроніки це була проблема. Більше того, оскільки від кілограма залежали одиниці сили (ньютон), тиску (паскаль) та енергії (джоуль), ця нестійкість розхитувала всю структуру фізики. Ситуація стала комічною: маса світу залежала від чистоти металевого шматка у французькому передмісті. (Кульмінація: Версаль 2018) Науковий загаль усвідомив: епоха артефактів остаточно завершилася. Розпочалася «гонка» за новими методами визначення маси через квантові константи. Два змагальних проєкти — терези Кібла (Watt balance) та дослідження Авогадро (кремнієва сфера) — змагалися, щоб пов'язати масу з константою Планка. Фіналом цього етапу стала 26-та Загальна нарада у Версалі, що відбулася у листопаді 2018 року. Це була подія

виняткового значення. Представники 60 держав одноставно підтримали повну зміну системи SI. Було ухвалено роз'єднати кілограм, ампер, кельвін та моль від матеріальних еталонів і прив'язати їх до основних констант природи: сталої Планка, елементарного електричного заряду, сталої Больцмана та числа Авогадро. Таким чином, період з 1960 до 2018 року став шляхом відновлення старих ідей до повної відмови від людського підходу. Ми припинили міряти світ «речами» і почали вимірювати його «законами буття». Це рішення 2018 року відчинило браму у нову еру «Квантового SI».

1.3. Революційна ревізія системи SI 2018–2019 років

Датою, яка розділила світ вимірювань на «до» і «після», стало 20 травня 2019 року — Всесвітній день метрології.

Саме в цей день набули чинності рішення, прийняті на історичній 26-й Генеральній конференції мір і ваг у Версалі. Це була не просто технічна поправка. Це була зміна філософії, яку науковці назвали «найбільшою революцією з часів Французької революції».

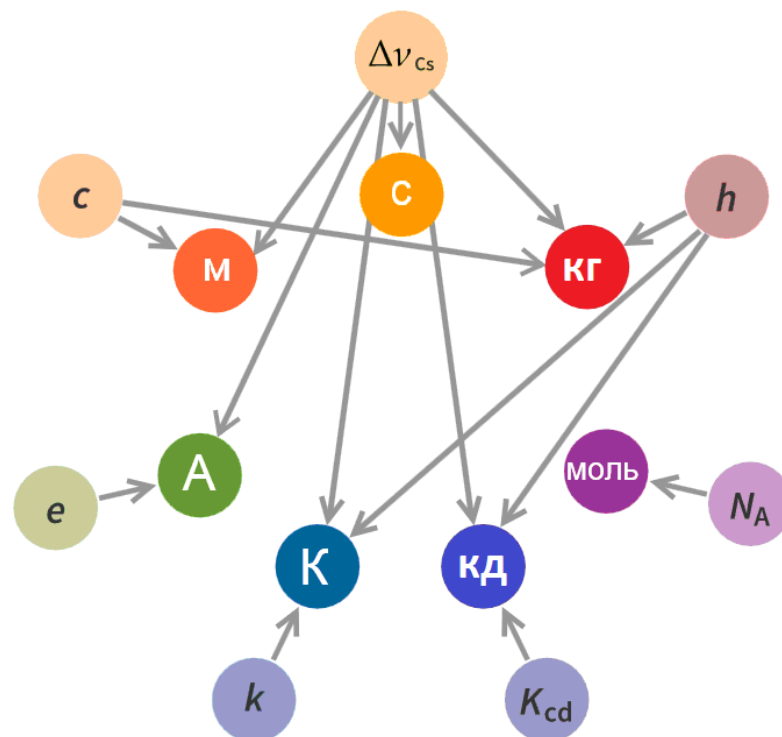


Рисунок 1.2 – Міжнародна система SI зразку 2019-го року

У чому полягала суть змін? Протягом століть ми діяли за логікою: «Ось шматок металу, це кілограм. Давайте виміряємо його властивості». Це робило наші вимірювання залежними від нестабільної матерії.

Реформа 2019 року перевернула цю піраміду. Вчені домовилися зафіксувати точні числові значення семи фундаментальних констант природи. Тепер не еталон визначає константу, а константа визначає еталон.

Ми сказали: «Стала Планка (h) тепер точно дорівнює $6.62607015 \cdot 10^{-34}$ ». Крапка. Жодної похибки. І вже від цього числа ми математично виводимо, що таке кілограм.

Найдраматичніша зміна торкнулася саме маси. Платиновий циліндр «Grand K», про який ми говорили раніше, був офіційно відправлений «на пенсію». Він став просто історичним музейним експонатом.

Тепер кілограм реалізується за допомогою надскладного приладу — ваг Кіббла (Kibble balance).

Як це працює? Ваги Кіббла врівноважують механічну силу тяжіння (масу вантажу) електромагнітною силою. Оскільки електричні величини ми вміємо вимірювати з квантовою точністю (через ефекти Джозефсона та Клітцинга), ми фактично зважуємо предмети, використовуючи квантову механіку. Маса тепер прямо пов'язана зі сталою Планка. Це триумф теоретичної фізики.

Що це означає для вашої теми — вимірювання довжини?

Здавалося б, метр був перевизначений ще у 1983 році, то що змінилося зараз?

Ревізія 2019 року остаточно завершила побудову системи, де секунда і метр є фундаментом. У новій системі SI існує сувора ієрархія:

1. Найточніше ми вимірюємо Час (частоту переходів в атомі цезію).
2. Через швидкість світла Час перетворюється на Довжину (метр).
3. А тепер, через сталу Планка та ваги Кіббла, Довжина і Час беруть участь у визначенні Маса.

Тобто, методи визначення довжини, які ви розглядаєте у своїй дисертації, стали ще більш критичними, адже точність вимірювання довжини (лазерна інтерферометрія) тепер необхідна навіть для того, щоб просто зважити кілограм цукру на еталонному рівні.

Головний наслідок цієї ревізії – це «демократизація» еталонів. Раніше, щоб мати точний кілограм, Україна повинна була звіряти свій національний еталон з еталоном у Франції. Це була залежність від одного місця на карті.

Сьогодні визначення одиниць більше не прив'язані до Парижа. Будь-яка країна, будь-яка лабораторія (і навіть позаземна цивілізація на Марсі), маючи достатньо технологічне обладнання (ваги Кіббла, атомний годинник), може відтворити метр чи кілограм самостійно, не звіряючись ні з ким, окрім законів фізики.

Отже, еволюція завершилася. Ми пройшли шлях від довжини стопи монарха до швидкості світла та квантових констант. Система SI стала дійсно універсальною, абстрактною і вічною. І саме в цьому новому, квантовому контексті ми будемо розглядати сучасні методи визначення довжини в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. ЕВОЛЮЦІЯ ЕТАЛОНУ ДОВЖИНИ: ВІД МАЯТНИКА ДО ШВИДКОСТІ СВІТЛА

Історія визначення метра є яскравим відображенням прогресу фізики та геодезії. Аналіз архівних та сучасних документів дозволяє виділити ключові етапи цієї еволюції, кожен з яких підвищував точність відтворення одиниці на порядки.

2.1. Гравітаційна концепція (1790 рік)

Перша науково обґрунтована спроба визначити універсальну одиницю довжини була здійснена у 1790 році Національною Асамблеєю Франції. Було запропоновано, що метр дорівнюватиме довжині математичного маятника, напівперіод коливань якого становить рівно одну секунду.

Формула періоду коливань маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Звідси, для напівперіоду в 1 с ($T=2$ с), довжина L розраховується як $L = g / \pi^2$. При стандартному $g \approx 9.80665$ м/с², довжина такого маятника становить близько 0.994 м.

Однак, цей підхід був швидко відхилений науковою спільнотою через нестабільність гравітаційного поля Землі. Прискорення вільного падіння g залежить від географічної широти та висоти над рівнем моря (через відцентрову силу обертання Землі та її несферичність).

Документ наводить переконливий приклад варіативності g на території України: від 9.80551 м/с² у Сімферополі до 9.81161 м/с² у Чернігові. Це створює похибку відтворення метра на рівні ± 0.062 %, що є неприпустимим для прецизійних вимірювань.

2.2. Геодезичний етап та "Метр Архіву" (1791–1799 роки)

У пошуках більш стабільної основи, у 1791 році було прийнято рішення прив'язати метр до розмірів Землі, визначивши його як одну десятимільйонну частину чверті Паризького меридіана (відстань від екватора до Північного полюса через Париж). Математично це можна записати як:

$$L_{meter} = \frac{1}{10000000} * L_{quarter_meridian}$$

Для реалізації цього визначення астрономи Жан-Батіст Деламбр та П'єр Мешен здійснили героїчну геодезичну експедицію (1792–1799 рр.), вимірявши методом триангуляції дугу меридіана між Дюнкерком і Барселоною. Сектор Деламбра: Північна частина дуги, від Дюнкерка до Родеза.

Сектор Мешена: Південна частина дуги, від Барселони до Родеза.

Вимірювання проводилися в надзвичайно складних умовах Великої французької революції та воєнних дій, що неодноразово призводило до арештів вчених та конфіскації обладнання.

Ключовим технічним досягненням цього етапу стало використання повторювального кола Борда (*cercle répétiteur*).

На відміну від класичних квадрантів, цей інструмент дозволяв виконувати багаторазові вимірювання кутів без обнулення шкали між відліками. Це значно зменшувало похибку зчитування та дозволяло досягти точності до однієї кутової секунди, що було революційним для геодезії XVIII століття.

На основі їхніх розрахунків у 1799 році було виготовлено платинову лінійку — "Метр Архіву" (*Mètre des Archives*). Це була кінцева міра (відстань між торцями), яка стала першим фізичним втіленням метра.

Пізніші, більш точні геодезичні дослідження виявили, що через неправильне врахування сплюснутості Землі (у розрахунках 1799 року)

перший прототип виявився коротшим за "істинну" частку меридіана на 0.2 мм. Однак, щоб уникнути постійних змін еталону при уточненні розмірів Землі, метрологи вирішили залишити довжину Метра Архіву як еталонну, фактично відмовившись від прямої прив'язки до меридіана.

2.3. Матеріальний Міжнародний прототип (1889–1960 роки)

У другій половині XIX століття стало очевидним, що «Метр Архіву» (1799) не задовольняє зростаючі вимоги науки та промисловості. Чиста платина була занадто м'якою, а форма кінцевої міри призводила до зношування торців при кожному вимірюванні. Крім того, розвиток міжнародної торгівлі вимагав єдиного стандарту, визнаного всіма країнами.

20 травня 1875 року в Парижі 17 країн підписали Метричну конвенцію (Convention du Mètre). Ця угода заклала інституційну основу для створення та підтримки міжнародних еталонів, заснувавши Міжнародне бюро мір і ваг (BIPM). Головним завданням Бюро стало виготовлення нових прототипів метра та кілограма.

Для нового еталона було обрано спеціальний сплав, запропонований французьким хіміком Сент-Клер Девілем:

Склад: 90 % платини (Pt) та 10 % іридію (Ir).

Переваги: Додавання іридію зробило матеріал значно твердішим за чисту платину, зберігаючи при цьому високу стійкість до окислення та корозії. Цей сплав також відзначався дрібнозернистою структурою, що дозволяло наносити на нього надзвичайно тонкі штрихи.

Для мінімізації похибок, викликаних прогином стрижня під власною вагою, французький інженер Анрі Треска розробив особливу форму поперечного перерізу еталона.

Замість прямокутного бруска (як у 1799 році) було використано стрижень з X-подібним перерізом (вписаним у квадрат 20 * 20 мм). Це рішення мало дві ключові переваги:

1. Нейтральна вісь: Штрихи, що визначають довжину метра, наносилися на перемичку «ікса» (нейтральну площину). У цій зоні деформації розтягування/стискання при згинанні стрижня є мінімальними (фактично нульовими).

2. Термостабілізація: Така форма забезпечувала кращий теплообмін з навколишнім середовищем, дозволяючи еталону швидше приймати температуру термостата.

Затвердження Міжнародного прототипу (1889 рік)

У 1889 році на I Генеральній конференції з мір і ваг (CGPM) було офіційно затверджено новий еталон. З 30 виготовлених зразків, примірник № 6, довжина якого при 0°C була найбільш близькою до «Метра Архіву», був оголошений Міжнародним прототипом метра.

Нове визначення:

Одиницею довжини є метр, що визначається як відстань між осями двох середніх штрихів, нанесених на платино-іридієвий стрижень, коли він знаходиться при температурі 0°C і під нормальним атмосферним тиском, будучи підтриманим на двох роликах діаметром не менше 1 см, розташованих симетрично в одній горизонтальній площині на відстані 571 мм один від одного (точки Бесселя).



Рисунок 2.1 – Еталон метра зразка 1889 року.

Важливим метрологічним нюансом стала зміна типу міри. Якщо еталон 1799 року був «кінцевою мірою» (відстань від краю до краю), то еталон 1889 року став «штриховою мірою» (*mètre à traits*). Довжина визначалася відстанню між мікроскопічними рисками, що виключало фізичний контакт з робочими поверхнями й запобігало зношуванню.

Точність відтворення цього еталона становила близько 10^{-7} (0,1 мікрометра), що задовольняло потреби науки до середини ХХ століття.

2.4. Оптичний етап: Криптон-86 (1960–1983 роки)

До середини ХХ століття точність Міжнародного прототипу метра перестала задовольняти потреби передової науки та техніки. Головною проблемою була ширина штрихів, нанесених на платино-іридієвий стрижень. Під мікроскопом ці штрихи виглядали як нерівні канави, що обмежувало точність визначення їхніх центрів. Крім того, існував ризик пошкодження або втрати унікального артефакту, що зберігався у Севрі.

Вченим був потрібен еталон, який не міг би «зіпсуватися» і який можна було б відтворити в будь-якій добре обладнаній лабораторії світу.

Ідея використання довжини світлової хвилі як природного еталона належала ще Жаку Бабіне (1827) та була розвинута Альбертом Майкельсоном, який у 1890-х роках виміряв довжину метра в довжинах хвиль червоної лінії кадмію. Однак лише в 1960 році технології дозволили офіційно закріпити цей підхід.

14 жовтня 1960 року XI Генеральна конференція з мір і ваг (CGPM) скасувала визначення метра 1889 року та прийняла нове:

Метр — це довжина, що дорівнює 1 650 763,73 довжинам хвиль у вакуумі випромінювання, яке відповідає переходу між рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома криптону-86.

Математично це виглядає так:

$$1 \text{ м} = 1\,650\,763,73 * \lambda_{Kr}$$

Вибір ізотопу криптону не був випадковим.

1. Інертний газ: Атоми в газі слабо взаємодіють між собою, що мінімізує зсув спектральних ліній.
2. Парно-парне ядро: Ізотоп має парну кількість протонів і нейтронів, що дає нульовий спі́н ядра. Це усуває надтонку структуру спектральних ліній, роблячи лінію випромінювання надзвичайно вузькою та чіткою.
3. Помаранчевий колір: Обрана лінія (вакуумна довжина хвилі $\lambda \approx 605,78 \text{ нм}$) знаходилася в зручному для спостереження видимому діапазоні.

Для практичного відтворення метра використовувалася спеціальна газорозрядна лампа, розроблена німецьким фізиком Е. Енгельгардом.



Рисунок 2.2 – Криптонова лампа

Лампа заповнювалася газом криптону. Для зменшення теплового розширення спектральної лінії (ефект Доплера) лампу охолоджували до потрібної точки азоту (63,15 або -210°C). Вимірювання проводилися за допомогою інтерферометра Фабрі-Перо, який дозволяв "рахувати" інтерференційні смуги з неймовірною точністю.

Це дозволило підвищити точність відтворення метра на порядок — до 10^{-8} (близько 0,01 мкм).

Попри значний прогрес, криптоновий стандарт проіснував відносно недовго (лише 23 роки). У 1960 році, майже одночасно з прийняттям нового визначення, був винайдений лазер. Лазерне випромінювання давало набагато вужчі та стабільніші спектральні лінії, ніж газорозрядна лампа. Крім того, виявилось, що спектральна лінія криптону все ж таки має невелику асиметрію, що обмежувало подальше підвищення точності.

2.5. Фіксація швидкості світла (з 1983 року)

Поява стабілізованих лазерів у 1970-х роках виявила обмеженість криптонового стандарту. Лазери забезпечували настільки вузьку спектральну лінію та високу стабільність частоти, що похибка відтворення метра стала обмежуватися вже не інструментом, а самим визначенням (асиметрією лінії криптону). Виникла парадоксальна ситуація: точність вимірювання швидкості світла стала вищою, ніж точність еталона довжини, яким цю швидкість вимірювали.

Щоб вирішити цю проблему, метрологічна спільнота пішла на радикальний крок: зафіксувати швидкість світла як точну константу.

21 жовтня 1983 року було прийнято визначення, яке змінило ієрархію фізичних величин. Метр втратив свою незалежність і став похідною від часу (секунди) та швидкості світла.

Метр — це довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за інтервал часу $1/299\,792\,458$ частку секунди.

Це визначення ґрунтується на постулаті спеціальної теорії відносності про сталість швидкості світла у вакуумі c .

Ключовим моментом стало те, що швидкість світла більше не підлягає вимірюванню. Її значення було постульоване точно:

$$c = 299\,792\,458 \text{ м/с.}$$

Чому саме це число? Воно було обране для забезпечення спадкоємності з попереднім (криптоновим) метром. Це дозволило уникнути стрибка у

вимірюваннях для промисловості та науки, зберігаючи всі попередні дані актуальними в межах їхньої похибки.

У 2019 році відбулася фундаментальна реформа Міжнародної системи одиниць (SI), яка остаточно відв'язала всі одиниці від фізичних артефактів. Хоча фізична суть метра не змінилася з 1983 року, формулювання стало більш суворим і прив'язаним до «явних констант».

Згідно з Брошурою SI (9-те видання), метр визначається через фіксацію числового значення швидкості світла у вакуумі c , вираженої в одиницях м/с, де секунда визначається через частоту надтонкого переходу цезію-133 ($\Delta\nu_{Cs}$).

Формальний запис визначення:

$$1 \text{ м} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) c = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \approx 30,6633 \frac{c}{\Delta\nu_{Cs}}.$$

Таким чином, метр тепер фактично є відношенням двох фундаментальних констант (швидкості світла та частоти переходу цезію).

Оскільки неможливо безпосередньо виміряти час польоту світла на відстані в 1 метр з достатньою точністю ("прямий метод"), на практиці метр реалізують через вимірювання частоти лазера.

Використовуючи формулу $\lambda = c/f$, де c — фіксована константа, а f — виміряна частота, ми отримуємо точну довжину хвилі.

Основним інструментом реалізації метра сьогодні є гелій-неоновий лазер, стабілізований по йоду (He-Ne/I₂). Його випромінювання (довжина хвилі ≈ 633 нм) є де-факто робочим еталоном, що забезпечує відносну похибку порядку $10^{-11} - 10^{-12}$.



Рисунок 2.3 – Приклад гелій-неонового лазера.

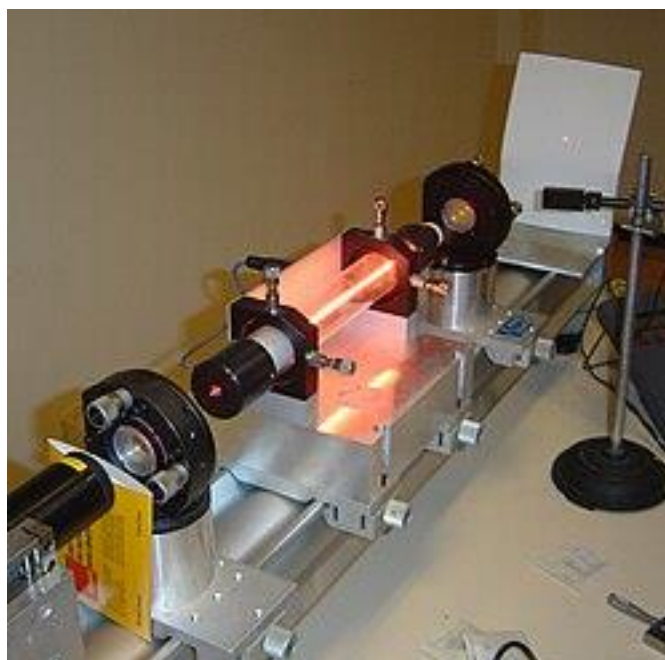


Рисунок 2.4 – Гелій-неоновий лазер більш сучасного зразку.

РОЗДІЛ 3. СУЧАСНА ФІЗИКА ВИМІРЮВАННЯ ДОВЖИНИ ТА "НОВА SI"

3.1. Структура єдиного еталону часу-частоти-довжини

З переходом до визначення метра через швидкість світла (1983 р.) та ревізією SI (2019 р.), класичне поняття «первинного еталона метра» як незалежного пристрою зникло. Натомість сформувалася концепція єдиного еталонного комплексу часу, частоти та довжини.

В основі цієї структури лежить принцип: оскільки швидкість світла c є точною константою, точність відтворення одиниці довжини (λ) залежить виключно від точності вимірювання частоти (f) лазерного випромінювання, згідно з формулою:

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

Сучасна структура такого еталона складається з трьох ієрархічних рівнів.

1. Фундаментальний рівень: Атомний стандарт частоти

Вершиною піраміди є первинний еталон часу та частоти — цезієвий атомний репер.

- Принцип дії: Він відтворює одиницю часу (секунду) на основі переходу між надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.
- Робоча частота: Мікрохвильовий діапазон ($\approx 9,19$ ГГц).
- Точність: Сучасні "цезієві фонтани" забезпечують відносну похибку частоти порядку 10^{-16} .

Саме цей пристрій задає метрологічну базу для всіх вимірювань, включаючи лінійні.

2. Сполучна ланка: Оптичний частотний гребінець (Frequency Comb)

Це найбільш технологічно складна частина сучасного еталона, за розробку якої Т. Генш та Дж. Холл отримали Нобелівську премію з фізики (2005).

Проблема полягала в тому, що цезієвий годинник працює на радіочастотах (10^9 Гц), а лазери для вимірювання довжини — на оптичних частотах (10^{14} Гц). Прірву в 5 порядків неможливо було подолати прямим електронним лічильником.

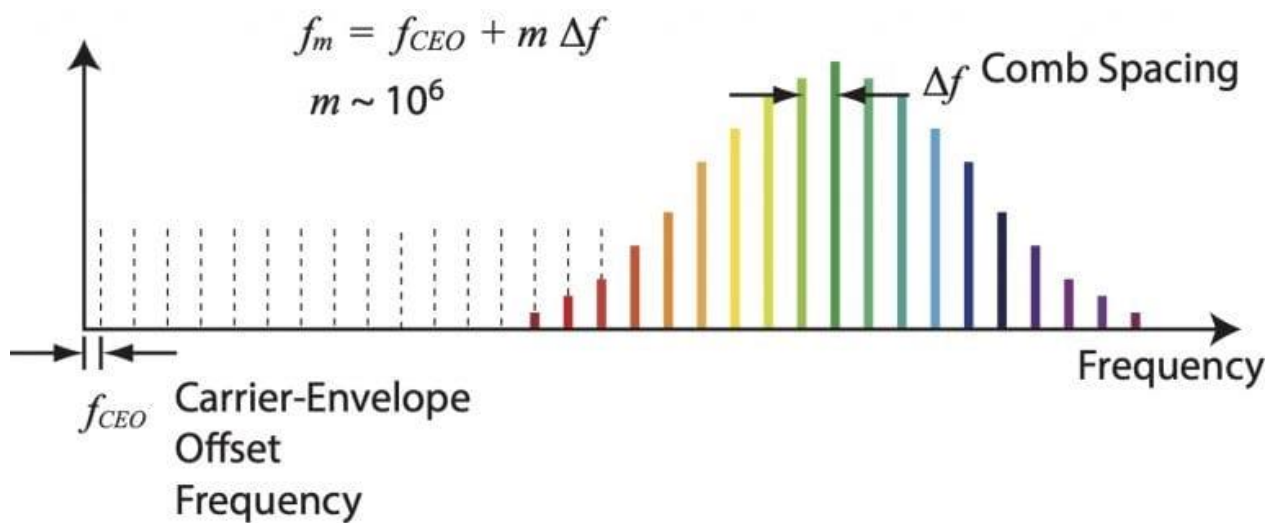


Рисунок 3.1 – Оптично частотні гребінці

Фемтосекундний оптичний гребінець діє як "редуктор", що жорстко зв'язує оптичну частоту з радіочастотою еталона часу. Він генерує спектр з мільйонів рівновіддалених ліній, частота n -ї лінії описується рівнянням:

$$f_n = n * f_{rep} + f_{ceo}$$

де: f_{rep} — частота повторення імпульсів (радіодіапазон, що синхронізується з цезієвим еталонем); f_{ceo} — частота зсуву (carrier-envelope offset); n — ціле число (номер моди, $\approx 10^5 - 10^6$).

Це дозволяє передати точність від цезієвого стандарту безпосередньо у світловий діапазон.

3. Робочий рівень: Стабілізовані лазери

Кінцевим елементом, який використовується безпосередньо для

вимірювання довжини (інтерферометрії), є лазери неперервної дії.

Тип: Найчастіше це гелій-неоновий лазер (He-Ne) з довжиною хвилі 633 нм або Nd:YAG лазери (532 нм).

Стабілізація: Частота лазера "прив'язується" до однієї з ліній поглинання молекулярного йоду ($^{127}_{I_2}$).

Калібрування: За допомогою оптичного гребінця частоту цього лазера вимірюють відносно цезієвого стандарту. Отримана точна частота перераховується у точну довжину хвилі λ , яка і стає "лінійкою" для вимірювань.

3.2. Принцип лазерної інтерферометрії

Лазерна інтерферометрія є основним методом передачі розміру одиниці довжини від еталона до робочих засобів вимірювань та високоточних промислових установок. В основі цього методу лежить використання явища інтерференції світлових хвиль для визначення відстані через кількість півхвиль, що вкладаються на шляху вимірювання.

Оптична схема Майкельсона

Більшість сучасних лазерних інтерферометрів базуються на модифікованій схемі інтерферометра Майкельсона.

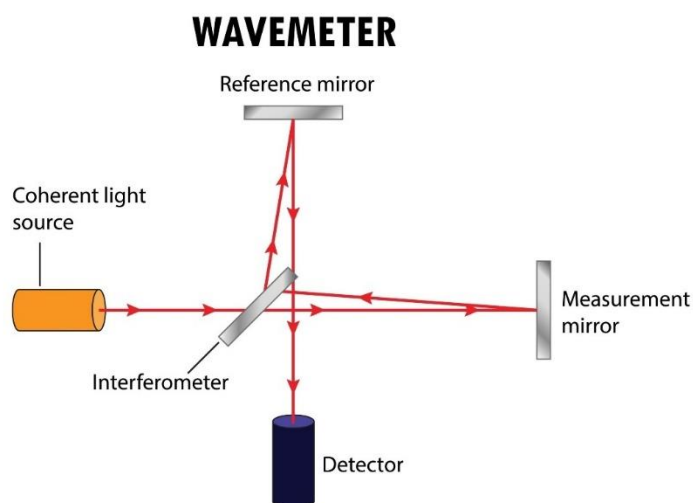


Рисунок 3.2 – Схема інтерферометра Майкельсона.

Принципова схема включає такі елементи:

1. Джерело світла: Стабілізований лазер (що випромінює світло з відомою довжиною хвилі λ).
2. Світлоподільник (Beam Splitter): Напівпрозоре дзеркало, яке розділяє пучок на два канали — опорний та вимірювальний.
3. Опорне дзеркало (Reference Mirror): Нерухомий відбивач, що задає фіксовану довжину оптичного шляху.
4. Вимірювальне дзеркало (Measurement Mirror): Рухомий відбивач, переміщення якого необхідно виміряти.
5. Фотодетектор: Пристрій, що реєструє інтенсивність інтерференційної картини.

Фізика процесу

Лазерний промінь розділяється світлоподільником на дві частини. Одна частина йде до опорного дзеркала, інша — до вимірювального. Відбившись, промені повертаються і знову з'єднуються на світлоподільнику, потрапляючи на фотодетектор.

Оскільки світло є хвилею, при накладанні двох пучків відбувається їх інтерференція. Результат залежить від різниці ходу променів:

Якщо різниця ходу дорівнює цілому числу довжин хвиль ($n\lambda$), хвилі підсилюють одна одну (конструктивна інтерференція — світла смуга).

Якщо різниця ходу дорівнює півцілому числу довжин хвиль ($(n + 0,5)\lambda$), хвилі гасять одна одну (деструктивна інтерференція — темна смуга).

При переміщенні вимірювального дзеркала інтерференційна картина на детекторі змінюється (світло-темрява-світло). Електронний лічильник підраховує кількість таких переходів (смуг).

Основне рівняння вимірювання

Відстань L , на яку перемістився об'єкт, визначається за формулою:

$$L = N * \frac{\lambda}{2},$$

де:

N — кількість підрахованих інтерференційних смуг; λ — довжина хвилі лазера;

Дільник 2 з'являється тому, що світло проходить вимірювану відстань двічі (туди й назад).

Переваги лазерного джерела

До винайдення лазерів інтерферометрія обмежувалася короткими відстанями через низьку когерентність звичайних джерел світла. Лазерне випромінювання має високу часову та просторову когерентність, що дозволяє отримувати чітку інтерференційну картину навіть при різниці ходу променів у десятки й сотні метрів. Це робить лазерну інтерферометрію універсальним інструментом як для нанометрології, так і для великогабаритних вимірювань (наприклад, у машинобудуванні чи геодезії).

Проблема середовища

Варто зазначити, що наведене вище рівняння є точним лише для вакууму. У реальних умовах вимірювання проводяться в повітрі, показник заломлення якого відрізняється від одиниці. Оскільки частота лазера (f) залишається стабільною, а швидкість світла в середовищі зменшується ($v = c/n$), довжина хвилі в повітрі (λ_{air}) змінюється:

$$\lambda_{air} = \frac{\lambda_{vac}}{n}$$

де n — показник заломлення повітря.

Нехтування цим фактором є основним джерелом похибки в сучасних інтерферометричних вимірюваннях.

3.3. Вплив показника заломлення повітря та компенсація похибок (Формула Едлена)

Оскільки сучасне визначення метра базується на швидкості світла у вакуумі, проведення вимірювань у повітряному середовищі вносить

суттєву систематичну похибку. Швидкість поширення світла в атмосфері (v) менша за швидкість світла у вакуумі (c), і ця різниця залежить від оптичної густини повітря.

Фізична сутність проблеми

Довжина хвилі лазера в повітрі (λ_{air}), яка безпосередньо використовується для вимірювання відстані в інтерферометрі, пов'язана з довжиною хвилі у вакуумі (λ_{vac}) через показник заломлення середовища (n):

$$\lambda_{air} = \frac{\lambda_{vac}}{n} = \frac{c}{n \cdot f}.$$

Для стандартного повітря показник заломлення становить приблизно $n \approx 1,00027$. Якщо ігнорувати цей фактор і вважати $n=1$, відносна похибка вимірювання складе близько $270 \cdot 10^{-6}$ (або 270 мкм на 1 метр). Це на кілька порядків перевищує допустимі похибки у прецизійному машинобудуванні та нанотехнологіях.

Емпірична формула Едлена

Показник заломлення повітря не є константою; він постійно змінюється залежно від параметрів навколишнього середовища. Для його розрахунку в метрології загальноприйнятим стандартом є рівняння Едлена (Bengt Edlén), вперше опубліковане в 1966 році та згодом уточнене (версія Bönsch & Potulski, 1998).

Формула враховує чотири основні параметри:

1. Температура повітря (T): Найбільш критичний фактор. Зміна температури на 1°C призводить до зміни довжини хвилі приблизно на 1 мкм/м (1 ppm).

2. Атмосферний тиск (P): Другий за важливістю фактор. Зміна тиску на 0,33 кПа викликає похибку близько 1 ppm.

3. Вологість повітря (H): Вплив вологості значно менший (зміна на 10% відносної вологості дає похибку $\approx 0,1$ ppm), але для нанометрових вимірювань він є суттєвим.

4. Вміст вуглекислого газу (CO₂): Зазвичай приймається стандартним (400–450 ppm), але в закритих лабораторіях з персоналом може зростати, впливаючи на результат.

Спрощена модель залежності показника заломлення ($n-1$) від параметрів має вигляд:

$$(n - 1)_{TP} = (n - 1)_{std} * \frac{P}{93325} * \frac{293,15}{273,15+T}.$$

Повна формула Едлена є складним поліномом, що враховує дисперсію світла та парціальний тиск водяної пари.

Автоматична компенсація (Метеостанції)

Сучасні лазерні інтерферометричні системи оснащуються високоточними метеостанціями («Weather Stations»). Датчики температури, тиску та вологості розміщуються безпосередньо в зоні вимірювання.

Система керування інтерферометром зчитує показники датчиків у реальному часі, обчислює актуальне значення n за формулою Едлена і динамічно коригує значення довжини хвилі λ_{air} . Це дозволяє зменшити похибку вимірювання в повітрі до рівня 0,1–0,5 мкм/м.

Метод рефрактометра (Tracker)

Існує альтернативний метод, який дозволяє уникнути використання формули Едлена — безпосереднє вимірювання показника заломлення. Для цього використовується спеціальний оптичний пристрій — рефрактометр.

Він вимірює різницю оптичного шляху між променем у повітрі та променем у вакуумованій трубці фіксованої довжини. Оскільки довжина хвилі у вакуумі відома точно, система автоматично визначає, наскільки повітря "сповільнило" світло, і вносить поправку. Цей метод є найточнішим, оскільки він реагує на реальний склад повітря (включаючи пари розчинників або інші домішки, які не враховуються датчиками тиску/температури).

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЕТАЛОНУ В УКРАЇНІ.

4.1 Державний первинний еталон одиниці довжини (ДЕТУ 01-03-98)

Ядром системи забезпечення єдності вимірювань довжини в Україні є Державний первинний еталон одиниці довжини (ДЕТУ 01-03-98), який зберігається та експлуатується в Національному науковому центрі «Інститут метрології» (м. Харків).

Цей еталон було створено у 1997 році та модернізовано у 2015 році для відповідності сучасним вимогам SI.

Технічні та метрологічні характеристики:

Принцип дії: Еталон реалізує визначення метра через частоту стабілізованого лазера та інтерферометричний метод вимірювання.

Склад: Група йод-стабілізованих He-Ne лазерів (633 нм), інтерферометричний компаратор для передачі розміру одиниці.

Діапазон відтворення: Забезпечує передачу розміру одиниці у діапазоні до 10 метрів.

Точність:

Сумарна стандартна невизначеність (v_c): $2.55 * 10^{-11}$

Розширена невизначеність (U, коефіцієнт охоплення $k=2$): $5.1 * 10^{-11}$

Цей показник означає, що похибка відтворення метра в Україні становить близько 0.05 нанометра на метр довжини, що на два порядки точніше за попередній стандарт на основі криптону-86.

Підтвердження компетентності України на міжнародному рівні здійснюється через участь у ключових звіреннях (Key Comparisons) під егідою BIPM та EURAMET (наприклад, EURAMET.L-S24 по евольвентним еталонам, EURAMET.L-K1 по кінцевим мірам).

Результати цих звірень фіксуються в базі даних KCDB BIPM, що гарантує міжнародне визнання українських сертифікатів калібрування.

4.2 Система вторинних еталонів та ієрархія простежуваності

Для трансферу еталонної точності до промисловості в Україні розгорнуто систему вторинних еталонів, які калібруються безпосередньо від первинного (табл. 4.1).

Таблиця 1 – Система вторинних еталонів.

Шифр / Тип	Призначення	Діапазон	Примітка
ВЕТУ 01-03-08-08	Інтерференційна установка для штрихових мір	0.001 – 200 мм	Для калібрування скляних та металевих шкал, мікроскопів
Установки КМД	Калібрування плоскопаралельних кінцевих мір	0.1 – 1000 мм	"Плитки Йогансона" — основний цеховий еталон
Лазерні інтерферометри	Вимірювання великих довжин	до 60 м	Для повірки лазерних трекерів, координатних машин
ДЕТУ 01-01-96	Параметри евольвентних поверхонь	--	Критично для зубообробки та машинобудування
ДЕТУ 01-04-07	Параметри шорсткості (R_a, R_z)	0.025 – 1600 мкм	Контроль якості поверхні

Ця ієрархія забезпечує метрологічну простежуваність (traceability) — безперервний ланцюг передачі розміру одиниці від визначення SI (швидкість

світла) через Державний первинний еталон до робочого інструменту на заводі.

Високоточні вимірювання довжини є "нервовою системою" сучасної промисловості. Українські підприємства активно інтегрують передові методи, що спираються на національну еталонну базу.

4.3 Геодезія та картографія: Яворівський науковий полігон

Унікальним об'єктом національного надбання є Яворівський еталонний геодезичний базис (Львівська область), що входить до складу наукового полігону Національного університету «Львівська політехніка».¹⁸

Функція: Це "еталон просто неба", призначений для метрологічної атестації та перевірки світловіддалемірів, тахеометрів та GPS/GNSS-приймачів.

Технологія: Базис складається з мережі стабільних центрів (трубчасті конструкції, заглиблені в ґрунт), відстані між якими визначені з прецизійною точністю. ННЦ «Інститут метрології» проводить атестацію базису, використовуючи лазерні інтерферометри (Vaisala) та GPS-технології, забезпечуючи точність контролю лінійних інтервалів на рівні ~ 1 мм на кілометри дистанції.

Унікальність: Наявність "фазової ділянки" дозволяє виявляти специфічні циклічні похибки геодезичних приладів, що неможливо зробити в лабораторних умовах.

4.4 Авіабудування та аерокосмічна галузь

Авіабудування вимагає складання гігантських конструкцій (фюзеляж, крила) з допуском у частки міліметра. Традиційні засоби тут неефективні.

ДП «Антонов» та «Мотор Січ»: Використовують лазерні трекери (наприклад, виробництва Leica Geosystems) — мобільні координатно-вимірювальні машини, що працюють на принципі лазерної інтерферометрії. Трекери дозволяють контролювати геометрію стапелів, стикування секцій

фюзеляжу та монтаж двигунів у реальному часі. Точність цих трекерів безпосередньо залежить від їх калібрування, яке здійснюється з використанням еталонів, простежуваних до ДЕТУ 01-03-98.

4.5 Важке машинобудування та металургія

ПАТ «Запоріжсталь»: На металургійних підприємствах лазерні трекери використовуються для високоточної вивірки (alignment) прокатного обладнання, фундаментів, клітей та редукторів. Це дозволяє проводити налаштування багатотонного обладнання з мікронною точністю без демонтажу, значно скорочуючи час простою та підвищуючи якість прокату.

АТ «Турбоатом»: При виробництві турбін для АЕС та ГЕС критичним є контроль діаметрів роторів, площинності роз'ємів циліндрів та співвісності валів. Використання еталонних засобів вимірювання, повірених в ННЦ «Інститут метрології», гарантує надійність енергетичного обладнання країни.

4.6 Нанотехнології

Розвиток нанотехнологій в Україні спирається на вторинні еталони для калібрування скануючих зондових мікроскопів. Використання дифрактометричних установок та еталонів наноструктур (крок решітки) дозволяє вимірювати об'єкти розміром у нанометри, що є критичним для матеріалознавства та електроніки.

Законодавче регулювання та євроінтеграція

Імплементація нових визначень SI в Україні має не лише технічний, а й юридичний вимір.

Наказ Мінекономрозвитку № 914 (2015 р.): Цей документ став базовим для гармонізації українського законодавства з європейським, затвердивши визначення основних одиниць SI.

Оновлення 2019 року: У відповідь на ревізію SI та Директиву ЄС 2019/1258, Україна ініціювала внесення змін до законодавства для фіксації нових визначень одиниць через фундаментальні константи.

Маркування продукції: Згідно з вимогами Угоди про асоціацію з ЄС, Україна запровадила обов'язкове маркування продукції одиницями SI (латиницею та кирилицею). Перехідний період для бізнесу подовжувався до 2021 року, що дозволило виробникам адаптувати упаковку та документацію без зупинки експорту.

ВИСНОВОК

Еволюція еталону довжини пройшла шлях від локальних антропометричних мір через унікальні фізичні артефакти до універсальних квантових стандартів. Ревізія SI 2019 року остаточно "дематеріалізувала" метр, закріпивши його визначення через фундаментальну константу — швидкість світла, що забезпечує абсолютну стабільність еталону.

Україна володіє розвиненою, сучасною метрологічною інфраструктурою. Державний первинний еталон одиниці довжини ДЕТУ 01-03-98, з розширеною невизначеністю та відповідає найкращим світовим аналогам, що підтверджується міжнародними звіреннями. Дослідження у сфері фемтосекундних лазерів та оптичних гребінок в ННЦ «Інститут метрології» свідчать про високий науковий потенціал країни.

Еталон довжини є невидимим фундаментом української промисловості. Від нанометрових структур в електроніці до багатометрових крил літаків «Антонов» та прокатних станів — усі високоточні виробничі процеси залежать від ланцюга метрологічної простежуваності, що бере початок від державного еталону. Це є запорукою якості вітчизняної продукції, безпеки інфраструктури та інтеграції України у європейський економічний простір.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://www.ebsco.com/research-starters/science/international-system-units>
2. <https://www.iec.ch/history-si>
3. <https://physicsworld.com/a/the-evolution-of-the-metre-how-a-product-of-the-french-revolution-became-a-mainstay-of-worldwide-scientific-collaboration/>
4. https://www.sciencelearn.org.nz/interactive_timeline/13-measurement-a-timeline
5. https://en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units
6. <https://www.nist.gov/si-redefinition>
7. <https://metrologie-francaise.lne.fr/en/metrology/history-units>
8. https://www.coomet.net/fileadmin/user_files/DOCUMENTS/ORGANIZATION_TC/TC_1.5/Annual_Reports_TC_1.5/Annual_Report_of_TC_1-5_2011_En.pdf
9. <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=268>
10. http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/news/2024/Information_about_measurement_standards_NSC_IM_19-03-2024.pdf
11. <https://cris.vtt.fi/en/publications/report-on-key-comparison-eurametlk12011-measurement-of-gauge-blo/>
12. <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=479>
13. <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=267>
14. <https://media.neliti.com/media/publications/307166-support-of-metrological-traceability-of-f759504b.pdf>
15. ВІРМ, ІЕС, ІФСС, ІЛАС, ІСО, ІУРАС, ІУРАР та ОІМЛ, Міжнародний словник метрології – Основні та загальні поняття та пов'язані терміни (VIM), Міжнародне бюро мір та ваг, 2012, JCGM 200.
16. Л. Нільсен, Оцінювання порівнянь вимірювань методом найменших квадратів, Данський інститут фундаментальної метрології, 2000, Технічний звіт DFM-99-R39. [9] М. Г. Кокс, Оцінювання ключових даних порівняння,

Метрологія, т. 39, 2002. О. Самойленко, О. Адаменко, Обробка результатів вимірювань довжини для налаштування або калібрування далекомірів та тахометрів на внутрішньопольовому компараторі, Геодезія, картографія та аерофотозйомка, 90, 2019.

17. Ю . Кузьменко, О. Самойленко, Опрацювання методом найменших квадратів результатів вимірювань за ключовими, регіональними та додатковими звіреннями еталонів - Обробка методом найменших квадратів результатів вимірювань для ключових, регіональних та додаткових порівнянь еталонів, метрології та приладів, 70, 2018.

18. <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/cbfa07ea-d101-425a-b50e-e49d4442b108/content>

19. https://www.researchgate.net/publication/379906877_25_years_of_Yavoriv_SGP_-_structure_usage_research_scope_prospects

20. <https://ena.lpnu.ua/items/8e6450a2-95e8-439c-915c-45d8eb444c2c>

21. <https://www.iec-expo.com.ua/en/aviaen-2021.html>

22. <https://ditc-contact.ua/proect/vprovadzhennja-dlja-pidpriemstva-absoljutnogo-lazernogo-trekera-leisa-at403/>

23. <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=b40a08a8-a921-490f-909c-a2a91bba5ba4&title=NakazMinekonomrosvitkuVid04-08-2015-914-proZatverdzhenniaViznachenOsnovnikhOdinitsSi-NazvTaViznachenPokhidnikhOdinitsSi-DesiatkovikhKratnikhIChastinnikhVidOdinitsSi-DozvolenikhPozasistemnikhOdinits-ATakozhYikhPoznachenTaPravilZastosuvanniaOdinitsVimiriuvanniaINapisanniaNazvTaPoznachenOdinitsVimiriuvanniaISimvolivVelichin-ZarestrovaniUMiniusti25-08-2015-Za1022-27467>

NazvTaViznachenPokhidnikhOdinitsSi-

DesiatkovikhKratnikhIChastinnikhVidOdinitsSi-

DozvolenikhPozasistemnikhOdinits-

ATakozhYikhPoznachenTaPravilZastosuvanniaOdinitsVimiriuvanniaINapisanniaNa

zvTaPoznachenOdinitsVimiriuvanniaISimvolivVelichin-ZarestrovaniUMiniusti25-

08-2015-Za1022-27467

24. <http://me.gov.ua/Documents/Detail/b40a08a8-a921-490f-909c-a2a91bba5ba4?isSpecial=true&lang=uk-UA&title=DerzhavniiSekretar>

25. <http://pharmliga.com.ua/news/latest/vidterminovano-vvedennya-v-diyu-vimog-shhodo-markuvannya-produkcii-odinicyami-si.html>