

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Кібербезпеки
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)

Розробка електронного протоколу калібрування гир
(тема)

Виконав:
здобувач _____ 3 _____ року навчання,
групи ЯППЗу-23-1
Михайло МИХАЙЛЮКОВ
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Якість продукції, процесів та програмного забезпечення
(повна назва освітньої програми)

Керівник ас. каф. ІВТ, Валерій СЕМЕНІХІН
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ІВТ _____
(підпис)

Ігор ЗАХАРОВ
(власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Кібербезпеки
Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Якість продукції, процесів та програмного забезпечення
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Михайлюкову Михайлу Вадимовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка електронного протоколу калібрування гир

- затверджена наказом університету від 20 травня 2026 р. № 408 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24 06 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій, ДСТУ OIML R 111-1:2008 Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 і M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1. Вимоги нормативної документації до гир. 2. Теоретичні засади щодо гир. 3. Аналіз методики калібрування гир. 4. Розробка електронного протоколу калібрування гир і представлення результатів.
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Тема роботи, цілі та завдання роботи. Вимоги нормативної документації. Класифікація гир. Аналіз та вибір методики калібрування та методики розрахунку невизначеності під час калібрування гир. Розробка електронного бюджету невизначеності та протоколу калібрування гир.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз вимог нормативної документації	29.05.2025	
2	Аналіз особливостей та класифікації гир	03.06.2025	
3	Аналіз методики калібрування гир	06.06.2025	
4	Розробка електронного протоколу та бюджету невизначеності	15.06.2025	
5	Практична перевірка розробленого протоколу калібрування гир	23.06.2025	

Дата видачі завдання 20 05 2026 р.

Здобувач 
(підпис)

Керівник роботи  ас. Валерій СЕМЕНІХІН
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка 50 с., 5 рис., 5 табл., 10 джерел, 2 додатки.

Об'єкт дослідження – набір гир 1мг - 500г класу F1.

Мета роботи – розроблення електронного протоколу калібрування гир.

Проведено аналіз основних сучасних нормативних документів що стосуються застосування та калібрування гир, серед яких вимоги Закону України "Про метрологію та метрологічну діяльність", ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 "Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій", ДСТУ OIML R 111-1:2008 "Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 і M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування".

Досліджено конструкцію, класифікацію, умови експлуатації та фактори, що впливають на калібрування гир.

Досліджено стандартизовану методику калібрування гир і обрано найбільш оптимальні для застосування у виробничих лабораторіях варіанти калібрування гир і розрахунків внесків невизначеностей.

У практичній частині було розроблено протокол калібрування гир, який пройшов практичне опробування і надо рекомендації щодо його застосування у лабораторіях підприємств та організацій для проведення внутрішнього калібрування або проміжних перевірянь гир.

ГИРИ, КАЛІБРУВАННЯ, ПРОМІЖНІ ПЕРЕВІРЯННЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ
ВИМІРЮВАНЬ, КЛАС ТОЧНОСТІ.

ABSTRACT

Explanatory note: 50 pages, 5 figures, 5 tables, 10 sources, 2 appendices.

Research object – set of weights 1 mg – 500 g of accuracy class F1.

Purpose of the work – development of an electronic calibration protocol for weights.

An analysis of the main modern regulatory documents concerning the use and calibration of weights was conducted, including the requirements of the Law of Ukraine "On Metrology and Metrological Activities", DSTU EN ISO/IEC 17025:2019 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", and DSTU OIML R 111-1:2008 "Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1. Metrological and technical requirements".

The design, classification, operating conditions, and factors affecting the calibration of weights were studied.

A standardized methodology for the calibration of weights was examined, and the most optimal options for use in production laboratories for weight calibration and uncertainty contribution calculations were selected.

In the practical part, a calibration protocol for weights was developed, which underwent practical testing and provides recommendations for its application in the laboratories of enterprises and organizations for internal calibration or intermediate verification of weights.

**WEIGHTS, CALIBRATION, INTERMEDIATE VERIFICATION,
MEASUREMENT UNCERTAINTY, ACCURACY CLASS.**

ЗМІСТ

	с.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	7
ВСТУП	8
1 ЗАКОНОДАВЧА ТА НОРМАТИВНА БАЗА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ МАСИ.....	9
1.1 Метрологічне забезпечення зважувальних вимірювань та роль гир.....	9
1.2 Нормативно-правова база України	11
2 МЕТРОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО ГИР	14
2.1 Розвиток системи відтворення одиниці маси та еталонів	14
2.2 Теоретичні основи калібрування та проміжних перевірянь гир	19
2.3 Метрологічні характеристики гир	22
2.4 Технічні характеристики гир	24
3 АНАЛІЗ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ГИР.....	29
3.1 Загальні положення.....	29
3.2 Умови калібрування.....	29
3.3 Підготовка до калібрування.....	30
3.4 Проведення калібрування.....	31
3.5 Розрахунок невизначеності вимірювань під час калібрування.....	34
3.6 Стандартна невизначеність процесу зважування u_w (тип А).....	35
3.7 Невизначеність еталонної гирі $u(m_{cr})$ (тип В).....	36
3.8 Невизначеність поправки на виштовхувальну силу u_b (тип В).....	36
3.9 Невизначеність ваги u_{ba} (тип В).....	38
3.10 Бюджет невизначеності.....	39
4 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРОТОКОЛУ КАЛІБРУВАННЯ ГИР.....	41
4.1 Загальні вимоги до проколів калібрування.....	41
4.2 Співставлення теоретичних формул з реалізацією в електронному протоколі Excel.....	45
ВИСНОВКИ	48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	49

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

Символ	Визначення
U	Розширена невизначеність
m_c	Умовне значення маси
m_N	Номінальне значення маси еталонної гирі
m_{ref}	Опорна вага тестового навантаження
MPE	Гранично допустима похибка у заданому контексті
n	Кількість одиниць
p	Атмосферний тиск
s	Стандартне відхилення
t	Температура (у градусах Цельсія)
u	Стандартна невизначеність
ρ	Густина
ρ_0	Опорна густина повітря
ρ_a	Густина повітря

ВСТУП

Забезпечення єдності вимірювань маси є одним із фундаментальних завдань сучасної метрології. Гирі як еталонні міри маси відіграють ключову роль у ланцюгу метрологічної простежуваності, забезпечуючи точність і достовірність результатів зважування на всіх рівнях — від наукових досліджень до промислового виробництва та комерційних операцій.

Відповідно до вимог п. 6.4.10 стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 [4], лабораторії зобов'язані проводити проміжні перевіряння або калібрування обладнання для підтримання довіри до його метрологічної придатності між двома послідовними калібруваннями або повірками. Однак стандартні процедури калібрування часто виявляються надмірно складними для повсякденного використання. У зв'язку з цим виникає потреба в оптимізації цих процедур шляхом розробки електронного протокола калібрування з метою зниження трудомісткості при збереженні необхідного рівня метрологічної надійності результатів та простежуваності.

Актуальність теми зумовлена тим, що навіть високоточні еталонні гирі з часом можуть втрачати свої метрологічні характеристики під впливом зовнішніх факторів (забруднення, корозія, механічні пошкодження, температурні коливання тощо). Повне калібрування гир відповідно до ДСТУ OIML R 111-1:2008 є трудомістким і ресурсозатратним процесом, тому для регулярного контролю їхнього стану в лабораторіях підприємств особливо важливими стають проміжні перевіряння (intermediate verifications) або ж внутрішні калібрування для яких доцільно автоматизувати частину розрахунків і оформлення результатів шляхом розробки електронного протоколу калібрування гир.

1 ЗАКОНОДАВЧА ТА НОРМАТИВНА БАЗА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ МАСИ

1.1 Метрологічне забезпечення вимірювань маси та роль гир

Метрологічне забезпечення зважувальних вимірювань є одним з фундаментальних напрямків метрології, оскільки маса належить до базових фізичних величин, а зважування — до найбільш поширених видів вимірювань у науці, промисловості, торгівлі, медицині, сільському господарстві та інших сферах людської діяльності. Від точності та достовірності результатів зважування безпосередньо залежить якість продукції, безпека процесів, справедливість комерційних операцій та надійність наукових досліджень.

Згідно із Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [2], одним з ключових принципів метрологічного забезпечення є єдність вимірювань та метрологічна простежуваність результатів до національного еталона одиниці маси, який, у свою чергу, простежується до міжнародного прототипа кілограма. Реалізація цього принципу неможлива без використання високоякісних еталонних засобів вимірювальної техніки, серед яких особливе місце посідають гирі.

Гирі виконують роль матеріальних носіїв одиниці маси і є основним інструментом передачі розміру одиниці маси від вищих еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки (зважувальних приладів). Вони забезпечують:

- Повірку та калібрування неавтоматичних зважувальних приладів (відповідно до OIML-R-76 [5]);
- Калібрування та повірку гир нижчих класів точності;
- Безпосереднє використання у лабораторних і виробничих вимірюваннях маси.

Відповідно до ДСТУ OIML R 111-1:2008 «Гирі класів точності E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} і M_3 . Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування» [1], гирі застосовують у трьох основних напрямках (п. 1.1 стандарту):

- як еталонні — для перевірки чи калібрування зважувальних приладів;
- як еталонні — для перевірки чи калібрування гир більш низького класу точності;
- під час роботи зі зважувальними приладами.

Таким чином, гирі утворюють ієрархічну систему метрологічного забезпечення у сфері вимірювань маси, забезпечуючи безперервний ланцюг простежуваності від національного еталона до робочих засобів вимірювання.

Важливість гир обумовлена тим, що сучасні електронні зважувальні прилади (ваги) хоча й мають високі технічні характеристики, але їхня метрологічна надійність у процесі експлуатації знижується через вплив зовнішніх чинників (температура, вібрація, пил тощо). Тому регулярна перевірка зважувальних приладів за допомогою еталонних гир є обов'язковою вимогою законодавчо регульованої метрології.

Границі допустимої похибки (максимальна допустима похибка — *maximum permissible error*, MPE) для кожного класу гир наведені в Таблиці 1 розділу 5 стандарту [1]. Вони встановлюються для умовної маси гирі при референсних умовах (температура 20 °C). Так для гир вищих класів (E і F) похибки значно менші, ніж для класів M.

Вибір класу точності залежить від:

- Класу точності зважувального приладу, що перевіряється;
- Необхідної точності вимірювання;
- Умов експлуатації;
- Економічної доцільності.

У сучасних акредитованих лабораторіях для внутрішніх проміжних перевірянь часто використовують гирі на один-два класи точності вище, ніж це необхідно, щоб забезпечити достатній запас точності.

Таким чином, система класів точності, встановлена ДСТУ OIML R 111-1:2008, є основою для побудови ефективної ієрархічної метрологічної системи забезпечення єдності зважувальних вимірювань в Україні. Вона дозволяє

раціонально розподіляти еталонні ресурси та забезпечувати необхідний рівень довіри до результатів вимірювань на всіх рівнях.

Важливим аспектом є те, що похибка визначення маси гирі, яка застосовується для повірки зважувального приладу, не повинна перевищувати $1/3$ від границь допустимої похибки самого приладу.

Таким чином, гирі є не просто допоміжним засобом, а ключовим елементом національної системи забезпечення єдності вимірювань маси. Від їхніх метрологічних характеристик (точності, стабільності, відсутності магнітних властивостей, правильної густини тощо) залежить якість усього ланцюга простежуваності.

У сучасних умовах, коли більшість лабораторій підприємств не є акредитованими, особливої актуальності набуває питання проведення проміжних перевірок (*intermediate verifications*) гир або калібрувань між повірками або калібруваннями в акредитованих лабораторіях. Це дозволяє підтримувати довіру до метрологічного стану гир.

1.2 Нормативно-правова база України

Нормативно-правова база метрологічного забезпечення зважувальних вимірювань в Україні побудована на принципах гармонізації національного законодавства з міжнародними та європейськими вимогами, зокрема рекомендаціями Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML). Вона забезпечує єдність вимірювань, метрологічну простежуваність результатів і захист прав споживачів у сфері торгівлі та промисловості.

Основоположним нормативним документом у цій сфері є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05 червня 2014 року № 1314-VII. Закон визначає правові засади забезпечення єдності вимірювань в Україні, встановлює вимоги до засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), метрологічного контролю, повірки, калібрування та нагляду за відповідністю.

Відповідно до статті 7 Закону, результати вимірювань можуть бути використані у сфері законодавчо регульованої метрології лише за умови, що

для них відомі відповідні характеристики похибок або невизначеність вимірювань. Це безпосередньо стосується гир, які є ключовими еталонними засобами для зважувальних вимірювань. Закон також зобов'язує суб'єктів господарювання підтримувати метрологічну придатність засобів вимірювання протягом усього строку експлуатації.

Важливим елементом законодавства є міжповірочні інтервали для законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки. Вони встановлені Наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 13.10.2016 № 1747 «Про затвердження міжповірочних інтервалів законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, за категоріями» [3] (zareestrovaniy в Мін'юсті 01.11.2016 за № 1417/29547).

Згідно з цим Наказом для гир встановлено такі міжповірочні інтервали:

- Для гир загального призначення класу точності M_1 та 4–6 класів точності масою до 20 кг — 2 роки;
- Для інших гир — 1 рік.

Ці інтервали є максимальними і не можуть бути скорочені власником засобів вимірювання але власник залежно від інтенсивності використання, умов експлуатації та вимог внутрішньої системи якості може проводити проміжні перевіряння або калібрування гир для впевненості в тому що вони придатні до застосування у межах міжповірочного періоду.

Для акредитованих калібрувальних лабораторій ключовим документом є ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» [4]. Пункт 6.4.10 цього стандарту вимагає проведення проміжних перевірянь обладнання між двома послідовними калібруваннями або повіркками для підтримання довіри до його працездатності.

Основним технічним нормативним документом, що безпосередньо регулює вимоги до гир, є ДСТУ OIML R 111-1:2008 «Гирі класів точності E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} і M_3 . Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи

випробування». Цей стандарт замінив попередній ДСТУ ГОСТ 7328-2003 [8] і встановлює:

- Метрологічні вимоги (границі допустимої похибки);
- Технічні вимоги (форма, матеріал, густина, магнітні властивості, шорсткість поверхні);
- Методи випробувань і процедури калібрування.

Стандарт застосовується до гир номінальною масою від 1 мг до 5000 кг і є обов'язковим для використання в сфері законодавчо регульованої метрології.

Додаткову нормативну базу складають:

- OIML R 76 «Неавтоматичні зважувальні прилади» — щодо вимог до повірки зважувальних приладів за допомогою гир;
- Постанова Кабінету Міністрів України від 04.06.2015 № 374 «Про затвердження переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці» [9];
- Постанова Кабінету Міністрів України від 16.12.2015 № 1195 «Про затвердження Порядку встановлення міжповірочних інтервалів для законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки за категоріями» [10];
- Національні стандарти, що регламентують вимоги до акредитації лабораторій та оформлення результатів калібрування/повірки.

Таким чином, нормативно-правова база України створює цілісну систему, в якій гирі виступають як ланка метрологічного ланцюга простежуваності. Водночас вона надає лабораторіям певну гнучкість у виборі методів проміжного контролю, що дозволяє оптимізувати процедури без зниження рівня метрологічної надійності.

У наступних розділах звіту буде детально розглянуто технічні вимоги ДСТУ OIML R 111-1:2008 та адаптовано процедуру калібрувань гир, яка повністю відповідає нормативним вимогам і забезпечує створення електронного протоколу калібрування гир для подальшого його застосування.

2 МЕТРОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО ГИР

2.1 Розвиток системи відтворення одиниці маси та еталонів

Історія розвитку гир, ваг та систем вимірювання маси є однією з найдавніших сторінок історії людської цивілізації. Потреба у визначенні маси різних предметів виникла ще на ранніх етапах розвитку суспільства, коли між людьми почали формуватися торговельні відносини, обмін товарами, ремісниче виробництво та перші форми державного управління. Саме необхідність забезпечення справедливого товарообміну, контролю кількості дорогоцінних металів, зерна, тканин та інших матеріальних цінностей стала причиною появи перших засобів зважування та еталонних важків, які можна вважати прообразами сучасних гир.

Археологічні дослідження свідчать, що найдавніші системи вимірювання маси почали формуватися ще у IV–III тисячолітті до нашої ери на території Месопотамії, Стародавнього Єгипту та долини Інду. Саме ці цивілізації першими створили організовані системи торгівлі та державного обліку, для яких були необхідні хоча б відносно стандартизовані засоби вимірювання. Найперші гирі виготовлялися з каменю, глини або металу і мали досить просту форму. Вони використовувалися разом із важільними терезами, принцип роботи яких ґрунтувався на рівновазі двох плечей важеля.

У Месопотамії вже існували системи одиниць маси, засновані на шекелі, міні та таланті. Ці одиниці використовувалися для торгівлі зерном, сріблом, золотом та іншими цінними товарами. Особливістю шумерської системи було те, що вона вже мала певний рівень централізації: еталонні важки зберігалися у храмах та адміністративних центрах, а їх використання контролювалося владою. Це було необхідно для запобігання шахрайству у торгівлі та зборі податків. Уже тоді виникало розуміння того, що від точності вимірювання маси залежить економічна стабільність держави.

У Стародавньому Єгипті вимірювання маси також мало надзвичайно важливе значення. Єгипетська економіка значною мірою базувалася на обліку

зерна, яке використовувалося як один із головних еквівалентів вартості. Для цього застосовувалися різноманітні гирі з каменю та бронзи, причому деякі з них виготовлялися з досить високою точністю для свого часу. Археологи виявили, що багато єгипетських гир мали стандартизовану масу та спеціальні позначення, що свідчить про існування ранніх форм метрологічного контролю. Крім торгівлі, ваги широко використовувалися під час будівництва храмів, виготовлення ювелірних виробів та у фармацевтичній практиці.

Особливо високий рівень стандартизації спостерігався у цивілізації долини Інду. У містах Хараппа та Мохенджо-Даро були знайдені набори кам'яних гир, виготовлених у формі правильних кубів. Їх маси підпорядковувалися чіткій системі співвідношень, що свідчить про існування добре розвиненої метрологічної системи. Дослідники вважають, що ця цивілізація створила одну з найбільш точних систем вимірювання стародавнього світу.

Подальший розвиток систем мір маси відбувався у Стародавній Греції та Римській імперії. У греків використовувалися драхми та таланти, а у римлян — лібри та унції. Римська імперія приділяла значну увагу стандартизації вимірювань, оскільки єдина система мір була необхідною для управління величезною територією держави. У багатьох містах існували офіційні державні еталони маси, а правильність зважування контролювали спеціальні посадові особи. Саме у цей період починає формуватися розуміння того, що еталон повинен бути єдиним і незмінним джерелом передачі одиниці маси.

Після падіння Римської імперії єдина система мір у Європі фактично припинила існування. У середньовіччі майже кожне місто, князівство або держава використовували власні одиниці маси. Одні й ті самі назви одиниць могли відповідати абсолютно різним значенням. Наприклад, фунт у Франції, Англії та німецьких землях суттєво відрізнявся. Це створювало значні труднощі у міжнародній торгівлі та ремісничому виробництві.

У цей період гирі переважно виготовлялися із заліза, бронзи або латуні. Їх форма була дуже різноманітною: від простих дисків та циліндрів до

декоративних важків у вигляді тварин або символічних фігур. У багатьох містах існували офіційні міські еталони маси, які зберігалися у ратушах або торгових палатах. Купці були зобов'язані періодично звіряти свої гирі з офіційними еталонами. Саме у середньовіччі почали з'являтися перші елементи державного метрологічного нагляду.

До XVIII століття різноманіття систем мір стало серйозною проблемою для науки, промисловості та міжнародної торгівлі. Особливо гостро це проявилось під час промислової революції, коли швидкий розвиток техніки вимагав уніфікації вимірювань. Учені дедалі більше усвідомлювали необхідність створення універсальної системи одиниць, яка не залежала б від окремих держав і ґрунтувалася б на природних фізичних величинах.

Наприкінці XVIII століття, під час Французької революції, була створена метрична система. Французька академія наук запропонувала нову систему одиниць, побудовану на десятковому принципі. Спочатку кілограм визначався як маса одного кубічного дециметра чистої води при температурі максимальної густини. Таке визначення мало принципово новий характер, оскільки базувалося не на довільному предметі, а на природному фізичному явищі.

У 1799 році був виготовлений перший матеріальний еталон кілограма — так званий Архівний кілограм. Він являв собою циліндр із платини. Саме з цього моменту починається історія сучасної метрології маси. У подальшому розвиток міжнародної торгівлі та науки вимагав створення міжнародної системи еталонів. У 1875 році була підписана Метрична конвенція, яка стала одним із найважливіших документів в історії метрології. На її основі було створено Міжнародне бюро мір та ваг (BIPM), Міжнародний комітет мір та ваг (CIPM) та Генеральну конференцію з мір та ваг (CGPM).

У 1889 році був офіційно затверджений міжнародний прототип кілограма — циліндр із платиново-іридієвого сплаву, який зберігався у спеціальних умовах у місті Севр поблизу Парижа. Цей прототип мав висоту та діаметр приблизно 39 мм і виготовлявся зі сплаву, що містив 90 % платини та

10 % іридію. Такий матеріал був обраний через високу корозійну стійкість, малий коефіцієнт теплового розширення та добру механічну стабільність. Саме міжнародний прототип кілограма протягом більш ніж ста років був основою всієї світової системи вимірювання маси.

Від міжнародного прототипу виготовлялися офіційні копії, які передавалися національним метрологічним інститутам різних країн. Далі через систему вторинних еталонів та еталонних гир одиниця маси передавалася робочим засобам вимірювання. Саме так почала формуватися сучасна система метрологічної простежуваності.

Проте з часом стало зрозуміло, що матеріальний еталон має фундаментальні обмеження. Незважаючи на надзвичайно високу стабільність платиново-іридієвого сплаву, маса міжнародного прототипу та його копій поступово змінювалася. Причинами були адсорбція молекул із навколишнього середовища, мікроскопічне зношування, очищення поверхні та інші фактори. Хоча зміни становили лише десятки мікрограмів, для сучасної високоточної метрології цього було достатньо, щоб виникла необхідність перегляду самого принципу визначення кілограма.

У XX столітті розвиток квантової фізики відкрив можливість визначати одиниці через фундаментальні фізичні константи. Поступово виникла ідея відмовитися від матеріального еталона та перейти до визначення кілограма через сталу Планка. Це стало можливим завдяки розвитку надточних вимірювальних технологій.

Одним із ключових інструментів нового визначення стали ваги Кіббла, раніше відомі як ват-ваги. Принцип їх роботи базується на порівнянні механічної та електричної потужності. За допомогою квантових електричних ефектів — ефекту Джозефсона та квантового ефекту Холла — стало можливим реалізувати одиницю маси через фундаментальні фізичні константи. Такі установки є надзвичайно складними та дорогими, а їх створення доступне лише провідним національним метрологічним інститутам світу.

Паралельно розвивався інший напрям — проєкт Avogadro, пов'язаний із використанням кремнієвих сфер. У межах цього проєкту створювалися майже ідеальні монокристалічні сфери з ізотопу кремнію-28. Вимірюючи об'єм сфери та параметри кристалічної решітки, вчені могли визначити кількість атомів у сфері та надзвичайно точно обчислити масу через число Авогадро. Кремнієві сфери стали одними з найбільш точних штучних об'єктів, коли-небудь створених людиною: відхилення їх поверхні від ідеальної сфери становить лише кілька десятків нанометрів.

У 2019 році Генеральна конференція з мір та ваг офіційно затвердила нове визначення кілограма через фіксоване значення сталої Планка. Це стало історичною подією для світової метрології, оскільки вперше одиниця маси перестала залежати від конкретного матеріального предмета.

Незважаючи на це, у практичній метрології гирі й надалі залишаються основним засобом передачі одиниці маси. Сучасна система метрологічної простежуваності має багаторівневу структуру: від фундаментального визначення кілограма через сталу Планка одиниця маси передається національним еталонам, далі — вторинним еталонам, гирям класу E₁, E₂, F₁, F₂ та робочим гирям класів M. Саме через цю систему забезпечується єдність вимірювань у промисловості, науці, медицині, торгівлі та лабораторній практиці.

Сучасні еталонні гирі є високоточними технічними виробами, виготовлення яких потребує використання спеціальних матеріалів та технологій. Для гир високих класів точності застосовують нержавіючі немагнітні сплави з високою стабільністю густини та мінімальною магнітною сприйнятливостю. Особлива увага приділяється шорсткості поверхні, геометричній формі, стійкості до корозії та довготривалій стабільності маси. Від точності та стабільності таких гир залежить надійність усієї системи забезпечення єдності вимірювань маси.

Таким чином, історія розвитку гир та систем відтворення одиниці маси є прикладом безперервного розвитку людської науки і техніки — від

примітивних кам'яних важків стародавніх цивілізацій до сучасних квантових методів реалізації кілограма через фундаментальні фізичні константи. Саме цей багатовіковий розвиток став основою сучасної метрології маси та створив умови для забезпечення високої точності вимірювань у всіх сферах діяльності людини.

2.2 Теоретичні основи калібрування та проміжних перевірянь гир

Калібрування гир є одним з основних метрологічних процесів, який забезпечує простежуваність одиниці маси від національного еталона до робочих засобів вимірювальної техніки. Згідно з ДСТУ OIML R 111-1:2008 та міжнародним словником метрологічних термінів (VIM), калібрування — це сукупність операцій, які встановлюють за заданих умов співвідношення між значеннями величин, відтворюваними еталоном, і відповідними значеннями, що показує або відтворює засіб вимірювання (гиря).

Теоретичною основою калібрування гир є принцип метрологічної простежуваності (traceability), який вимагає, щоб результат вимірювання міг бути пов'язаний з еталоном одиниці маси через безперервний ланцюг порівнянь, кожне з яких має відомі невизначеності. Для гир таким ланцюгом є: міжнародний еталон кілограма (через сталу Планка) → національний еталон → еталонні гирі класів E_1 , E_2 → гирі класів F → гирі класів M → робочі зважувальні прилади.

Основною метою калібрування є визначення умовного значення маси (conventional mass, m_c) гирі та оцінка її відхилення від номінального значення. Умовна маса — це маса еталонної гирі густиною 8000 кг/м^3 , яка врівноважує випробну гирю в повітрі густиною $1,2 \text{ кг/м}^3$ при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (OIML D 28 [6]). Використання саме умовної маси дозволяє значно зменшити вплив виштовхувальної сили повітря та спростити практичні вимірювання.

Границі допустимої похибки (Maximum Permissible Error — MPE або δm) є ключовим нормативним обмеженням, яке кількісно визначає, до якого класу точності може бути віднесена гиря. Вони встановлюють максимально припустиму різницю між умовним значенням маси гирі та її номінальним

значенням. Границі допустимої похибки наведено в Таблиці 1 розділу 5 ДСТУ OIML R 111-1:2008 для умов первинної повірки.

Таблиця 2.2 – Границі допустимої похибки

Номинальне значення маси	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂	M ₁	M ₁₋₂	M ₂	M ₂₋₃	M ₃
5000 кг	—	—	25 000	80 000	250 000	500 000	800 000	1 600 000	2 500 000
1000 кг	—	1 600	5 000	16 000	50 000	100 000	160 000	300 000	500 000
50 кг	25	80	250	800	2 500	5 000	8 000	16 000	25 000
10 кг	5,0	16	50	160	500	—	1 600	—	5 000
1 кг	0,5	1,6	5,0	16	50	—	160	—	500
100 г	0,05	0,16	0,5	1,6	5,0	—	16	—	50
10 г	0,020	0,06	0,20	0,6	2,0	—	6,0	—	20
1 г	0,010	0,03	0,10	0,3	1,0	—	3,0	—	10
100 мг	0,005	0,016	0,05	0,16	0,5	—	1,6	—	—
1 мг	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20	—	—	—	—

Важливою вимогою стандарту є обмеження розширеної невизначеності (U, при коефіцієнті охоплення k=2) результату калібрування:

$$U \leq \frac{1}{3} \delta m \quad (2.2.1)$$

Це означає, що невизначеність вимірювання повинна бути не більше третини від границь допустимої похибки. Даний принцип забезпечує достатній «запас точності» і є одним із ключових критеріїв метрологічної придатності гирі.

Для кожної гирі умовне значення маси m_c повинно задовольняти умову:

$$m_0 - (\delta m - U) \leq m_c \leq m_0 + (\delta m - U) \quad (2.2.2)$$

Для гир класів E₁ і E₂, які завжди супроводжуються сертифікатами про калібрування, користувач повинен обов'язково враховувати фактичне відхилення $m_c - m_0$.

Проміжні перевіряння (intermediate verifications) є окремим видом метрологічного контролю, який проводиться між двома послідовними калібруваннями або повірками. Відповідно до п. 6.4.10 ДСТУ ISO/IEC 17025:2019, лабораторія повинна проводити проміжні перевіряння для підтримання довіри до працездатності обладнання. Для гир проміжні перевіряння дозволяють:

- Виявити можливі зміни маси внаслідок забруднення, корозії, механічних пошкоджень або впливу зовнішніх чинників;
- Підтвердити стабільність метрологічних характеристик без проведення повного, трудомісткого калібрування;
- Зменшити ризики використання непридатних еталонних засобів у повсякденній діяльності лабораторії.

Теоретичною основою проміжних перевірянь є статистичний контроль стабільності. Він базується на порівнянні поточних результатів зважування з попередніми значеннями, використанні контрольних карт та оцінці стандартної невизначеності процесу вимірювання (невизначеність типу A).

Під час проміжних перевірянь не обов'язково визначати повну невизначеність за всіма компонентами (як при повному калібруванні), достатньо підтвердити, що гиря не вийшла за встановлені межі. Це дозволяє значно спростити процедуру, зменшити час і вартість контролю, зберігаючи при цьому прийнятний рівень метрологічної надійності.

Основні теоретичні принципи, які лежать в основі як калібрування, так і проміжних перевірянь гир:

1. Принцип заміщення (substitution method) — порівняння випробної гирі з еталонною;
2. Облік впливових чинників — виштовхувальна сила повітря, магнітні сили, температура, вологість, атмосферний тиск;

3. Оцінка невизначеності відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) [7] — поєднання невизначеностей типу А (статистичних) та типу В (з попередніх даних і сертифікатів);

4. Принцип мінімальної трудомісткості при збереженні необхідної довіри до результатів — основна ідея оптимізації процедури, що розглядається в даній роботі полягає у створенні електронного протоколу для автоматизації розрахунків.

Таким чином, теоретичні основи калібрування та проміжних перевірянь гир ґрунтуються на поєднанні фундаментальних метрологічних принципів (простежуваність, умовна маса, оцінка невизначеності) з практичними вимогами стандартів ДСТУ OIML R 111-1:2008 та ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Це створює науково обґрунтовану базу для розроблення оптимальних процедур контролю, які відповідають сучасним вимогам лабораторної практики.

2.3 Метрологічні характеристики гир

Одним з основних елементів метрологічних вимог до гир є їх поділ на класи точності. Класифікація дозволяє чітко визначити сферу застосування кожної гирі, встановити відповідні границі допустимої похибки та технічні вимоги, а також забезпечити оптимальний вибір еталонних засобів для конкретних метрологічних завдань.

Відповідно до п.1.3 стандарту ДСТУ OIML R 111-1:2008 [1], клас точності гир, які застосовують як еталонні для повірки або калібрування гир та зважувальних приладів, повинен відповідати певним вимогам стандарту. Стандарт установлює дев'ять класів точності: E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} і M_3 . Ця ієрархічна система відображає принцип метрологічної простежуваності — від найточніших гир (вищих еталонів) до робочих гир.

Класи точності E (E_1 та E_2):

Клас точності E_1 .

Це найвищий клас точності, призначений для забезпечення простежуваності між національними еталонами одиниці маси (значення маси

яких отримано від міжнародного прототипу кілограма) і гирями класів точності E_2 або нижче. Гирі класу E_1 використовуються переважно в національних метрологічних інститутах та еталонних лабораторіях найвищого рівня. Вони повинні супроводжуватися свідоцтвами про калібрування з розширеними невизначеностями. До них висуваються найжорсткіші вимоги щодо магнітних властивостей, шорсткості поверхні та стабільності.

Клас точності E_2 .

Гирі цього класу призначені для застосування під час повірки чи калібрування гир класу точності F_1 або для роботи зі зважувальними приладами спеціального класу точності I. Їх також можна використовувати як гирі класу E_1 за умови відповідності додатковим вимогам (шорсткість поверхні, магнітна сприйнятливість і намагніченість). Гирі або набори гир класу E_2 обов'язково супроводжуються свідоцтвами про калібрування.

Класи точності F (F_1 та F_2):

Клас точності F_1 .

Гирі призначені для повірки або калібрування гир класу F_2 , а також для роботи зі зважувальними приладами спеціального класу точності I та високого класу точності II. Вони забезпечують високий рівень точності в лабораторних умовах і важливих комерційних вимірюваннях.

Клас точності F_2 .

Застосовуються для повірки або калібрування гир класу M_1 (і, можливо, M_2), а також для важливих комерційних операцій (наприклад, з дорогоцінними металами та каменями) під час роботи зі зважувальними приладами високого класу точності II. Цей клас є перехідним між високоточними лабораторними гирями та робочими еталонами.

Класи точності M (M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} , M_3):

Клас точності M_1 .

Гирі призначені для повірки або калібрування гир класу M_2 та для роботи зі зважувальними приладами середнього класу точності III. Вони є

найбільш поширеними робочими еталонами в повсякденній метрологічній практиці.

Клас точності M_2 .

Використовуються для повірки гир класу M_3 , під час основних комерційних операцій та роботи зі зважувальними приладами середнього класу точності III.

Клас точності M_3 .

Призначені для роботи зі зважувальними приладами середнього класу точності III та звичайного класу точності III. Це найменш точний клас у системі.

Класи M_{1-2} , M_{2-3} та M_{3-3} .

Це спеціальні класи для гир великої маси (від 50 кг до 5000 кг) з дещо зниженими вимогами до точності порівняно з основними класами M . Вони призначені для важких гир, які використовуються в промисловості та торгівлі великогабаритними вантажами.

Класи точності утворюють чітку ієрархію:

$E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3$ — від найвищої точності до робочих гир.

Чим вищий клас (E), тим менші границі допустимої похибки, жорсткіші вимоги до матеріалу, густини, магнітних властивостей і стану поверхні. Зниження класу точності дозволяє використовувати простіші матеріали (наприклад, чавун для M_3) і спрощує конструкцію, але обмежує сферу застосування.

Важливим принципом є правило «одна третина»: похибка гирі, що застосовується для повірки зважувального приладу, не повинна перевищувати третину від границь допустимої похибки самого приладу (примітка до п. 1.3.1 ДСТУ OIML R 111-1:2008, посилання на OIML R 76).

2.4 Технічні вимоги до гир

Технічні вимоги до гир є не менш важливими, ніж метрологічні, оскільки вони безпосередньо впливають на стабільність маси гирі протягом

усього терміну експлуатації, її стійкість до зовнішніх впливів та можливість підтримання необхідної точності. Розділ 6–14 ДСТУ OIML R 111-1:2008 встановлює комплекс технічних вимог, які обов’язково повинні виконуватися для того, щоб гирю можна було віднести до того чи іншого класу точності.

2.4.1 Форма

Гирі повинні мати просту геометричну форму, яка полегшує їхнє виготовлення, очищення, транспортування та зважування. Стандарт рекомендує такі основні форми:

- Циліндричні (з головкою або без) — для гир класів E₁, E₂, F₁, F₂ невеликої маси;
- Паралелепіпедні (блокові) — для гир середньої маси;
- Круглі з ручкою або спеціальні форми для великих гир (від 50 кг і більше).

Форма повинна забезпечувати стійке положення гирі на вагах та мінімальний вплив повітряних потоків. Для гир класів E та F поверхня повинна бути гладкою, без гострих кутів і виступів, де може накопичуватися пил або забруднення.

2.4.2 Конструкція

Конструктивні вимоги суттєво відрізняються залежно від класу точності:

Для класів E₁ та E₂ (найвища точність):

- Гирі номінальною масою від 1 мг до 50 кг виконуються переважно одноцільними (без регулювальних порожнин) або з мінімальною підгінною порожниною.

- Гирі масою понад 50 кг можуть мати регулювальні порожнини, але з жорсткими обмеженнями.

Для класів F та M:

- Допускається наявність підгінних порожнин (камер) для регулювання маси.

– Великі гири (від 50 кг) можуть мати спеціальні конструкції з ручками, рольгангами або пазами для переміщення.

Усі гири повинні бути механічно стабільними, без внутрішніх напружень, які з часом можуть призводити до зміни маси. Конструкція повинна унеможливлювати несанкціоноване втручання в підгінні елементи.

2.4.3 Матеріал

Матеріал гир повинен забезпечувати:

- Високу корозійну стійкість;
- Низьке водопоглинання;
- Хімічну інертність;
- Стабільність розмірів і маси з часом.

Рекомендовані матеріали:

- Нержавіюча сталь (аустенітного класу) — для класів E₁, E₂, F₁, F₂;
- Латунь, бронза, чавун (з антикорозійним покриттям) — для класів M;
- Спеціальні сплави з контрольованою густиною.

Матеріал повинен бути однорідним, без включень, які можуть впливати на магнітні властивості або густину.

2.4.4 Магнітні властивості

Магнітні властивості – один з найважливіших технічних параметрів для гир високих класів точності. Магнітні сили можуть суттєво спотворювати результати зважування.

Стандарт встановлює жорсткі границі:

- Об’ємна магнітна сприйнятливості (χ);
- Постійна намагніченість (M).

Для класів E₁ та E₂ вимоги найжорсткіші ($\mu_0 M \leq 2,5$ мТл для E₁). Для класів M вимоги значно м’якші. Гири не повинні мати залишкового магнетизму, здатного створювати помітні сили при взаємодії з вагами або іншими гирями.

2.4.5 Густина

Густина матеріалу гирі нормується для правильного врахування виштовхувальної сили повітря при визначенні умовної маси.

Таблиця 4 стандарту [1] встановлює номінальні значення густини та допустимі відхилення для різних класів:

- Для класів E₁, E₂, F₁ — густина близька до 8000 кг/м³ (нержавіюча сталь);

- Для класів M — допускаються ширші діапазони залежно від матеріалу.

Відхилення густини від номінального значення обмежується, оскільки воно безпосередньо впливає на поправку на виштовхувальну силу повітря.

2.4.6 Стан поверхні

Якість поверхні безпосередньо впливає на:

- Адгезію пилу та забруднень;
- Корозійну стійкість;
- Стабільність маси з часом.

Стандарт нормує параметр шорсткості Ra (середнє арифметичне відхилення профілю). Для класів E₁ та E₂ вимоги до шорсткості найвищі ($Ra \leq 0,2-0,4$ мкм). Поверхня повинна бути полірованою, без подряпин, пор і оксидних плівок.

2.4.7 Підгонка

Підгонка гирі до номінального значення маси здійснюється шляхом видалення або додавання матеріалу (для класів E — переважно механічна обробка, для M — заповнення підгінних камер).

Важлива вимога: після підгонки порожнина повинна бути заповнена не більше ніж на 2/3 об'єму, щоб залишався запас для майбутніх коригувань.

2.4.8 Маркування

Маркування повинно бути чітким, стійким до стирання та містити:

- Номінальне значення маси;
- Клас точності (E₁, F₂, M₁ тощо);
- Товарний знак виробника;
- Рік виготовлення або індивідуальний номер;

– Для каліброваних гир — додаткові позначки.

Для гир класів Е маркування наноситься особливо акуратно, щоб не порушити поверхню.

3 АНАЛІЗ МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ГИР

3.1 Загальні положення

Для калібрування гир використовуються стандартизовані методи калібрування описані у Додатку С стандарту ДСТУ OIML R 111-1:2008 Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 і M3. Частина 1. Загальні технічні вимоги та методи випробування (OIML R 111-1:2004, IDT). Калібрування провидиться методом безпосереднього звіряння або методом згори-вниз для наборів гир, шляхом виконання заміщення еталонної гирі калібруємою під час декількох циклів вимірювань.

3.2 Умови калібрування

Згідно цього стандарту калібрування гир потрібно виконувати за стабільних зовнішніх умов, атмосферного тиску та температури близької до температури приміщення¹⁾. Типові рекомендовані значення наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Зовнішні умови протягом калібрування

Клас точності гирі	Зміни температури протягом калібрування ²⁾
E ₁	± 0,3 °C за годину з максимальною різницею ± 0,5 °C за 12 год
E ₂	± 0,7 °C за годину з максимальною різницею ± 1 °C за 12 год
F ₁	± 1,5 °C за годину з максимальною різницею ± 2 °C за 12 год
F ₂	± 2 °C за годину з максимальною різницею ± 3,5 °C за 12 год
M ₁	± 3 °C за годину з максимальною різницею ± 5 °C за 12 год
Границі відносної вологості повітря (hr) ³⁾	
E ₁	від 40 % до 60 % з максимальною різницею ± 5 % за 4 год
E ₂	від 40 % до 60 % з максимальною різницею ± 10 % за 4 год
F	від 40 % до 60 % з максимальною різницею ± 15 % за 4 год
¹⁾ Також важливо, щоб різниця між температурою гир та температурою повітря всередині компаратора маси була настільки малою, наскільки це можливо. Збереження еталонної та випробної гирі всередині компаратора маси перед калібруванням і під час нього може зменшити цю різницю температур.	
²⁾ Це зміна температури в лабораторії. Температурна стабілізація ваг і гир (див. В.4.3) також потребує стабільності відповідної температури лабораторії за 24 год до початку калібрування	
³⁾ Верхня границя, головним чином, важлива під час збереження гир.	

Для гир класів точності E₁ і E₂ температура повинна бути у межах від 18°C до 27°C. Умови навколишнього середовища повинні відповідати технічним вимогам до ваг.

При калібруванні усіх гир густина матеріалу приймається такою, що дорівнює $\rho_{\text{ref}} = 8000 \text{ кг/м}^3$ (умовна густина матеріалу), а густина навколишнього повітря $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Приміщення для калібрування гир класів точності E_1 , E_2 і F_1 має складатися з двох кімнат (зон). В одній здійснюють підготовку гир для калібрування та оформлення результатів, в іншій (ваговій) – визначення маси гир.

3.3 Підготовка до калібрування

З гирями необхідно поводитись і зберігати так, щоб вони залишалися чистими. Перед калібруванням пил та інші частки необхідно вилучати протираючи поверхню замшею або полотняною серветкою. Догляд за гирею не повинен змінювати властивості поверхні гирі (наприклад шляхом дряпання гирі).

Якщо гиря містить значну кількість бруду, який не може бути вилучено, методами зазначеними вище, то гирю або її окрему частину може бути вимито за допомогою очищеного спирту, дистильованої води або інших розчинників. Гирі із внутрішніми порожнинами не потрібно занурювати у розчин, запобігаючи проникненню рідини в отвір.

Після того як гирі очищено за допомогою розчинників вони повинні стабілізуватися протягом часу, наведеного в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Час стабілізації після очищення

Клас точності	E_1	E_2	F_1	Від F_2 до M_3
Після очищення за допомогою спирту	7 — 10 днів	3 — 6 днів	1 — 2 дні	1 год
Після очищення за допомогою дистильованої води	4 — 6 днів	2 — 3 дні	1 день	1 год

Перед калібруванням гирі повинні акліматизуватися до зовнішніх умов у лабораторії. Зокрема гирі класів E_1 , E_2 і F_1 повинні бути близькими до температури в зоні зважування.

Рекомендований час необхідний для температурної стабілізації – 24 год. Обов’язковий мінімальний необхідний час для температурної стабілізації наведено в таблиці В.2 ДСТУ OIML R 111-1:2008.

Метрологічні характеристики застосовуваного зважувального приладу повинні бути відомі з попередніх вимірювань і його роздільна здатність, лінійність, відтворюваність та похибка від розташування вантажу повинні бути такими, щоб досягти необхідної невизначеності.

Еталонна гиря зазвичай повинна бути більш високого класу точності, ніж гиря, яку калібрують. Під час калібрування гир однакового з еталонною класу точності, еталонна гиря повинна мати кращі метрологічні характеристики, ніж гиря, яку калібрують.

3.4 Проведення калібрування

3.4.1 Зовнішній огляд

Під час зовнішнього огляду гир повинно бути встановлено:

- якість покриття зовнішніх поверхонь, форма, маркування, комплектність і склад набору гир повинні відповідати експлуатаційній документації;
- на поверхні гир та футлярів не повинно бути тріщин, сколів, слідів корозії, забоїн, подряпин, плям.

3.4.2 Визначення метрологічних характеристик

3.4.2.1 Безпосереднє звіряння

Зазвичай калібровану гирю треба калібрувати за допомогою звіряння з однією або більше еталонними гирями. У кожному звірянні номінальна маса каліброваної та еталонної гир повинна бути однаковою.

3.4.2.2 Цикли зважування

Загальноприйняті процедури для трьох різних циклів зважування за одночасного звіряння описано нижче в п. 3.4.2.2.1 та 3.4.2.2.2.

У циклах зважування «А» представляє зважування еталонної гирі, «В» представляє зважування гирі, що калібрується. Цикли АВВА та АВА зазвичай застосовують під час калібрування гир класів точності Е і F.

Цикл АВ₁...В_nА зазвичай застосовують для гир класів точності М.

3.4.2.2.1 Звіряння гирі, що калібрується з еталонною гирею (рекомендовано для гир класів точності E і F)

Для двох гир можливі такі цикли що відомі як АВВА та АВА. Ці цикли усувають лінійний дрейф.

Цикл АВВА (r_1, t_1, t_2, r_2): $l_{r1\ 1}, l_{t1\ 1}, l_{t2\ 1}, l_{r2\ 1}, \dots, l_{r1\ n}, l_{t1\ n}, l_{t2\ n}, l_{r2\ n}$.

$$\Delta l_i = (l_{t1i} - l_{r1i} - l_{r2i} + l_{t2i})/2, \quad (1)$$

де $i = 1, \dots, n$.

Цикл АВА (r_1, t_1, r_2): $l_{r1\ 1}, l_{t1\ 1}, l_{r2\ 1}, \dots, l_{r1\ n}, l_{t1\ n}, l_{r2\ n}$.

$$\Delta l_i = l_{t1i} - (l_{r1i} + l_{r2i})/2, \quad (2)$$

де $i = 1, \dots, n$.

У циклах АВВА та АВА n – кількість циклів. Значення i наводять по черзі, за якої гирі потрібно розмішувати на зважувальній чашці. Тут підрядкові індекси « r » і « t » вказують на еталонну і гирю, що калібрується відповідно. Δl_i – різниця показів, отримана з циклу зважування i .

Часовий інтервал між зважуваннями повинен бути постійним.

3.4.2.2.2 Звірення кількох гир, що калібруються однакової номінальної маси з еталонною гирею (цикл АВ₁...В_nА)

Якщо кілька гир, що калібруються $t(j)$ ($j = 1, \dots, J$) однакової номінальної маси потрібно калібрувати одночасно, то цикл зважування АВА може бути видозмінено в АВ₁...В_nА так:

Цикл АВ₁...В_nА

$$l_{r1\ 1}, l_{t(1)\ 1}, l_{t(2)\ 1}, \dots, l_{t(J)\ 1}, l_{r2\ 1}, l_{r1\ 2}, l_{t(1)\ 2}, l_{t(2)\ 2}, \dots, l_{t(J)\ 2}, l_{r2\ 2}, \dots, \\ \left[l_{r1\ i-1}, l_{t(1)\ i-1}, l_{t(2)\ i-1}, \dots, l_{t(J)\ i-1}, l_{r2\ i-1}, l_{r1\ i}, l_{t(1)\ i}, l_{t(2)\ i}, \dots, l_{t(J)\ i}, l_{r2\ i} \right],$$

де $i = 1, \dots, n$.

$$\Delta l_{i(j)} = l_{t(j)i} - (l_{r1i} + l_{r2i})/2, \quad (3)$$

де $i = 1, \dots, n$.

Якщо можна знехтувати дрейфом у показах, тобто він менше або дорівнює 1/3 від необхідної невизначеності, то не є необхідним інвертувати порядок гир, що калібруються в АВ₁...В_nА у разі повторення циклу.

Кількість гир зазвичай повинна бути не більше ніж 5.

3.4.2.3 Кількість циклів зважування

Кількість циклів зважування, n , повинна ґрунтуватися на необхідній невизначеності, повторюваності та відтворюваності вимірювання. Мінімальну кількість вимірювань, які повинні виконувати для відповідних класів точності наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Мінімальна кількість циклів зважування

Клас точності	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂	M ₁ , M ₂ , M ₃
Мінімальна кількість АВВА	3	2	1	1	1
Мінімальна кількість АВА	5	3	2	1	1
Мінімальна кількість АВ ₁ ...В ₂ А	5	3	2	1	1

3.4.2.4 Обробка результатів вимірювань

3.4.2.4.1 Середнє значення різниці умовного значення маси – одна випробна гиря

Для циклів АВВА та АВА різниця умовного значення маси між випробною й еталонною гирею в циклі i :

$$\Delta m_c = m_{ct} - m_{cr}, \quad (4)$$

$$\Delta m_{cr} = \Delta l_i + m_{cr} C_i, \quad (5)$$

$$C = (\rho_w - \rho_o) \cdot \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_r} \right). \quad (6)$$

Середня різниця умовного значення маси за n циклів:

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_{cr}. \quad (7)$$

Якщо густину ρ_l або ρ_r гирі невідомо, але матеріал відомо, то потрібно застосовувати відповідну передбачувану густину з таблиці В.7 ДСТУ OIML R 111-1:2008. Якщо відомо тільки, що густина гирі знаходиться всередині допустимих границь, то потрібно застосовувати значення 8000 кг/м³.

У разі якщо поправку на виштовхувальну силу оцінюють як нехтовно малу, тобто

$$|C_i| \leq \frac{1}{3} \frac{U}{m_o}, \quad (8)$$

то член m_0C , можна не брати до уваги. Однак внесок невизначеності, зумовлений C , може не бути нехтовно малим.

3.4.2.4.2 Середнє значення різниці умовного значення маси – кілька випробних гирь

Якщо калібрують кілька випробних гирь відповідно до циклу зважування $AB_1...B_nA$, то середню різницю значень маси для гирі j отримують із формули (7) заміщенням Δl_i значенням $\Delta l_{i(j)}$ у формулі (5).

3.4.2.4.3 Середнє значення різниці умовного значення маси – кілька серій вимірювань

Якщо є кілька ідентичних серій вимірювань J із середнім значенням та з приблизно однаковими середньоквадратичними відхилами, то середнє значення всіх вимірювань:

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \overline{\Delta m_{c_j}}. \quad (9)$$

Кілька серій вимірювання зазвичай виконують тільки під час калібрування гирь класу точності E.

3.4.2.4.4 Умовне значення випробної гирі

Умовне значення випробної гирі може бути обчислено за формулою

$$m_{ct} = m_{cr} + \overline{\Delta m_c}. \quad (10)$$

3.5 Розрахунок невизначеності вимірювань під час калібрування

Моделльне рівняння знаходження маси гирі можна представити у вигляді:

$$Y = X + \Delta X + \delta X_b + \delta X_s + \delta X_d + \delta X_E + \delta X_{ma} \quad (11)$$

де Y – невідома умовна маса гирі;

X – умовна маса еталонної гирі;

ΔX – середня різниця умовного значення маси;

δX_b – поправка на виштовхувальну силу;

δX_s – поправка зумовлена чутливістю ваг;

δX_d – поправка зумовлена дискретністю електронних ваг;

δX_E – поправка зумовлена розташуванням вантажу на платформі;

δX_{ma} – поправка зумовлена магнітними властивостями.

3.6 Стандартна невизначеність процесу зважування u_w (тип A)

Стандартна невизначеність процесу зважування u_w є середньоквадратичним відхилом різниці значень маси. Для n циклів вимірювання:

$$u_w(\overline{\Delta m_c}) = \frac{s(\Delta m_c)}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

де $s(\Delta m_c)$ – для гир різних класів точності визначають нижче.

3.6.1 Для класів точності F_2 , M_1 , M_2 і M_3 зазвичай застосовують цикли АВВА, АВА та $AB_1 \dots B_n A$. Для цих класів точності гир, якщо СКВ вимірюваної різниці значень маси невідомо із статистичних даних, то його можна оцінювати як:

$$s(\Delta m_c) = \frac{\max(\Delta m_c) - \min(\Delta m_c)}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (13)$$

за $n \geq 3$ циклів вимірювань.

3.6.2 Для гир класів точності E_1 , E_2 і F_1 дисперсію різниці значення маси Δm_c під час процесу зважування $s^2(\Delta m_c)$ оцінюють з n циклів вимірювань:

$$s^2(\Delta m_c) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta m_{ci} - \overline{\Delta m_c})^2 \quad (14)$$

з $n - 1$ ступенів свободи, n повинно бути не менш ніж 5.

3.6.3 У разі, якщо є J серій вимірювання (де $J > 1$), дисперсію значення Δm_c оцінюють за допомогою об'єднання J серій так:

$$s^2(\Delta m_c) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J s_j^2(\Delta m_c) \quad (15)$$

з $J(n - 1)$ кількістю ступенів свободи.

3.7 Невизначеність еталонної гирі $u(m_{cr})$ (тип В)

Стандартну невизначеність маси еталонної гирі $u(m_{cr})$ треба обчислювати зі свідoctва про калібрування розподілом призначеної розширеної невизначеності U на коефіцієнт охоплення k (зазвичай $k = 2$) і поєднувати з невизначеністю внеску, зумовленого нестабільністю маси еталонної гирі $u_{inst}(m_{cr})$:

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + u_{inst}^2(m_{cr})}. \quad (16)$$

Невизначеність внеску, зумовленого нестабільністю маси еталонної гирі $u_{inst}(m_{cr})$, можна оцінювати зі змінами маси – дрейфом D , що спостерігають після того, як еталонну гирю калібрували кілька разів, за формулою:

$$u_{inst}(m_{cr}) = \frac{D}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

Якщо значення, отримані під час попередніх калібрувань, недоступні, то значення D можна обрати рівним розширеній невизначеності U з останнього свідoctва про калібрування.

Якщо комбінацію еталонних гир застосовують для звірянь і їхні коваріації невідомі, то можна передбачити коефіцієнт кореляції, що дорівнює одиниці. Це буде призводити до лінійного додавання невизначеностей:

$$u(m_{cr}) = \sum_i u(m_{cr,i}), \quad (18)$$

де $u(m_{cr,i})$ – стандартна невизначеність i -ї еталонної гирі. Це є верхня межа для невизначеності.

3.8 Невизначеність поправки на виштовхувальну силу u_b (тип В)

Невизначеність поправки на виштовхувальну силу розраховується за формулою:

$$u_b^2 = \left[m_{cr} \frac{(\rho_r - \rho_t)}{\rho_r \rho_t} u(\rho_a) \right]^2 + \left[m_{cr} (\rho_a - \rho_o) \right]^2 \frac{u^2(\rho_t)}{\rho_t^4} + m_{cr}^2 (\rho_a - \rho_o) \times \\ \times [(\rho_a - \rho_o) - 2(\rho_{al} - \rho_o)] \frac{u^2(\rho_r)}{\rho_r^4}, \quad (19)$$

де ρ_{ai} – густина повітря протягом (попереднього) калібрування еталонної гирі під час застосування еталонної гирі більш високого класу.

3.8.1 Навіть якщо поправкою на виштовхувальну силу можна знехтувати (див. 11.2.4.1), то невизначеність внеску, зумовленого явищем виштовхувальної сили, може не бути нехтовно малою, і її треба брати до уваги, якщо $u_b \geq u_c/3$.

3.8.2 Для гир класів точності М невизначеність внеску, зумовленого поправкою на виштовхувальну силу, нехтовно мала та на неї можна не зважати.

3.8.3 Для гир класу точності Е густину повітря потрібно визначати. Її невизначеність оцінюють із невизначеностей температури, тиску та вологості повітря. Формула обчислення густини повітря через апроксимацію CIPM-формули (1981/91):

$$\rho_a = \frac{0,34848p - 0,009(hr) \cdot \exp(0,061t)}{273,15 + t},$$

де ρ_a — густина повітря, отримана в кг/м³;

p — атмосферний тиск, наведений у мбар або ГПа;

hr — відносна вологість, виражена у відсотках; і

t — температура в °C.

(20)

3.8.4 Оцінка дисперсії густини повітря:

$$u^2(\rho_a) = u_F^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p} u_p \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t} u_t \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} u_{hr} \right)^2. \quad (21)$$

u_F = [невизначеність використовуваної формули]

(для CIPM-формули: $u_F = 10^{-4} \rho_a$)

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p} = 10^{-5} \rho_a \text{ Па}^{-1}, \quad \Downarrow$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = -3,4 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1} \rho_a, \quad \Downarrow$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} = -10^{-2} \rho_a,$$

3.8.5 Густина еталонної гирі ρ_l та її невизначеність має бути відомо із сертифіката калібрування або обрано з таблиці В.7 ДСТУ OIML R 111-1:2008 для відповідного матеріалу гир, використовуючи невизначеність, яка дорівнює третині від наведеної у таблиці для того самого сплаву.

3.9 Невизначеність ваг u_{ba} (тип В)

3.9.1 Невизначеність внеску, зумовленого чутливістю ваг

Якщо гирі градуують за допомогою гирі(гир)-допуска(-ів) з масою m_s і стандартною невизначеністю $u(m_s)$, то розраховують невизначеність внеску, зумовленого чутливістю:

$$u_s^2 = (\overline{\Delta m_c})^2 \left(\frac{u^2(m_s)}{m_s^2} + \frac{u^2(\Delta l_s)}{\Delta l_s^2} \right),$$

де Δl_s — зміна показів ваг, спричинена гирею-допуском;

$\overline{u(\Delta l_s)}$ — невизначеність Δl_s ; і

Δm_c — середня різниця значень маси між випробною й еталонною гирями. (22)

3.9.2 Невизначеність внеску, зумовленого дискретністю відліку електронних ваг

Для електронних ваг із ціною поділки шкали d невизначеність внеску, зумовленого роздільною здатністю:

$$u_d = \left(\frac{d/2}{\sqrt{3}} \right) \sqrt{2}, \quad (23)$$

3.9.3 Невизначеність внеску, зумовленого розташуванням вантажу на платформі

У більшості випадків невизначеність внеску u_E завжди перекривається невизначеністю внеску, зумовленого процесом зважування u_w і нею можна знехтувати.

3.9.4 Невизначеність внеску, зумовленого магнітними властивостями u_{ma}

Якщо гирі задовольняють вимогам стандарту ДСТУ OIML R 111-1:2008, то невизначеність внеску, зумовленого магнітними властивостями, u_{ma} , можна брати такою, що дорівнює нулю.

3.9.5 Сумарна стандартна невизначеність ваг u_{ba}

Невизначеності внесків додають квадратично так:

$$u_{ba} = \sqrt{u_s^2 + u_d^2 + u_E^2 + u_{ma}^2}. \quad (24)$$

3.9.6 Розширена невизначеність $U(m_{ct})$

Сумарну стандартну невизначеність умовного значення маси випробної гирі розраховують як:

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2(\Delta m_c) + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2}. \quad (25)$$

Якщо поправку на виштовхувальну силу $m_{cr}C$ не застосовують, то відповідний внесок виштовхувальної сили треба додавати до сумарної невизначеності в доповнення до u_b :

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2(\Delta m_c) + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + (m_{cr}C)^2 + u_{ba}^2}. \quad (26)$$

Розширена невизначеність умовного значення маси випробної гирі:

$$U(m_{ct}) = k u_c(m_{ct}). \quad (27)$$

Коефіцієнт охоплення обирається рівним 2 ($k = 2$).

3.10 Бюджет невизначеності

В таблиці 3.10 наведено узагальнений бюджет невизначеності. Конкретні розрахунки проводяться за допомогою спеціального програмного забезпечення для конкретного ЗВТ.

Таблиця 3.10 – Бюджет невизначеності

Величина X_i	Оцінка x_i	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Розподіл	Коефіцієнт чутливості c_i	Вклад у невизначеність $u_i(y)$
X	m_{cr}	(16) Залежить від РЕ	нормальний	1	$u(m_{cr})$
ΔX	Δm_c	(12) Залежить від РЕ та ЗВТ	нормальний	1	$u_w(\Delta m_c)$
δX_b	b	(19) Залежить від РЕ та ЗВТ	прямокутний	1	u_b
δX_s	s	(22)	прямокутний	1	u_s
δX_d	d	(23)	прямокутний	1	u_d
δX_E	E	-	прямокутний	1	u_E
δX_{ma}	ma	-	прямокутний	1	u_{ma}
					$u_c(m_{ct})$
Y	m_{ct}				$U(m_{ct}) = 2 \cdot u_c(m_{ct})$

Проаналізувавши процедури і методи вимірювань для калібрування гир наведені у стандарті, з метою спрощення виконання калібрування у звичайних виробничих лабораторіях з персоналом невисокої кваліфікації при збереженні надійності результатів вимірювань, нами було обрано використовувати метод безпосереднього звіряння для всіх вимірювань, використовувати 5 циклів вимірювань типу «АВА» для калібрування гир класу F1 (та E2 за технічної можливості лабораторій) та 3х циклів вимірювань типу «АВА» для гир нижчих класів точності. Також нами було створено модельне рівняння вимірювання маси та розроблено бюджет невизначеності на основі внесків невизначеності наведених у підрозділі 3.5 на основі яких було розроблено електронний бюджет невизначеності електронного протокола калібрувань про що докладніше у наступному розділі.

4 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРОТОКОЛУ КАЛІБРУВАННЯ ГИР

4.1 Загальні вимоги до проколів калібрування

Відповідно до п.7.8.2 стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» [4], для зведення до мінімуму будь-якої можливості неправильного розуміння або неправильного використання кожен звіт має містити щонайменше таку інформацію, якщо тільки лабораторія не має підтвердженого обґрунтування не робити цього:

- а) заголовок (наприклад, «Протокол калібрування»);
- б) назву та адресу лабораторії;
- в) місце проведення лабораторної діяльності, зокрема, якщо її виконують, застосовуючи матеріальні активи замовника або в місцях, що перебувають за межами постійних матеріальних активів лабораторії, або які пов'язані з тимчасовими чи мобільними матеріальними активами лабораторії;
- г) унікальну ідентифікацію, що всі складники звіту є частинами повного звіту, та чітку ідентифікацію закінчення звіту;
- д) назву та контактну інформацію замовника;
- е) ідентифікацію використаного методу;
- ж) опис, однозначну ідентифікацію та, за потреби, стан зразка;
- з) дату отримання зразка (зразків) для випробування чи калібрування, а також дату відбирання зразків, якщо це є критичним для достовірності й застосування результатів;
- и) дату(-и) виконання роботи лабораторією;
- й) дату видання звіту;
- к) посилання на план та метод відбирання зразків, використаних лабораторією або іншими органами, якщо це стосується достовірності чи застосування результатів;

- l) заяву про те, що результати стосуються тільки тих зразків, що були випробувані, відкалібровані або відібрані;
- m) результати, де застосовно, з одиницями вимірювання;
- n) доповнення, відхилення або винятки з методу;
- o) ідентифікацію персоналу, що затверджує звіт;
- p) однозначну ідентифікацію результатів, отриманих від зовнішніх постачальників [4].

Відповідно з метою виконання цих загальних вимог розроблений у ПЗ «Excel» електронний протокол (Додаток А) містить умовний блок інформації (рис. 1), яка стосується ідентифікації об'єкта та місця проведення робіт.

Калібрувальна лабораторія Calibration laboratory				
№ _____ Протокол калібрування від 16.06.2026 сторінка 1 з 1				
Об'єкт калібрування	Набір гир			
Тип (модель)	1mg - 500 g, F1	Серійний номер	50387	Клас (згідно з ДСТУ OIML R 111-1)
Виробник	ТзОВ НВП "Техноваги", Україна			
Замовник	-			
Місце проведення робіт	Калібрувальна лабораторія			
Метод калібрування	МК-М02 Гирі, важки, еталонні вантажі. Методика калібрування			

Рисунок 1 – Витяг з протокола калібрування гир, що стосується ідентифікації об'єкта калібрування і місця проведення робіт

Наступний умовний блок (рис.2) електронного протоколу стосується умов проведення калібрування та засобів вимірювання, які застосовуються під час калібрування і забезпечують простежуваність до відповідних національних та міжнародних еталонів і містить інформацію про температуру, вологість та атмосферний тиск під час вимірювань, а також інформацію про еталони і допоміжні ЗВ, а саме: найменування, заводський номер, номер сертифіката калібрування, дата видачі сертифіката калібрування та інформацію про те ким видано сертифікат калібрування.

Умови проведення калібрування

t, °C	22,6	RH, %	48,0±0,5	p, гПа	993
-------	------	-------	----------	--------	-----

Еталони

Найменування, тип, номер	Інформація щодо калібрування		
Набір гир 1 mg - 500 g, E2, зав. №54044	Сертифікат калібрування №	UA/35/250919/8253	від 19.09.2025
	виданий	ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»	
Неавтоматичний зважувальний прилад XPR 3003S/A, №C409673283	Сертифікат калібрування №	UA/35/250331/7082	від 31.03.2025
	виданий	ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»	
Неавтоматичний зважувальний прилад XPR 205/A, зав. №C409704400	Сертифікат калібрування №	UA/35/250331/7079	від 31.03.2025
	виданий	ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»	

Допоміжне обладнання

Найменування, тип, номер	Інформація щодо калібрування		
Термогігірометр і барометр Greisinger GFTB 200, зав. №34906770	Сертифікат калібрування №	UA/36/250207/000294	від 07.02.2025
	виданий	ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»	
	Сертифікат калібрування №	UA/39/250217/0153	від 17.02.2025
	виданий	ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»	
	Сертифікат калібрування №	UA/24/250218/0448	від 18.02.2025
	виданий	ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»	

Рисунок 2 - Витяг з протокола калібрування гир, що стосується умов проведення робіт і забезпечення простежуваності вимірювань

Наступний умовний блок Протокола (рис.3) стосується інформації, яка стосується безпосередньо результатів вимірювання. По-перше наводиться інформація про стан гир за результатами зовнішнього огляду, а по-друге наводяться вихідні дані, які необхідні для подальших розрахунків, а саме: інформація про еталонні гирі і допоміжне обладнання для вимірювання температури, вологості на атмосферного тиску повітря з сертифікатів калібрування та довідкових даних (наприклад, густина матеріалу і густина повітря), а також вносяться дані про умови навколишнього середовища і проводиться розрахунок густини повітря під час вимірювань за формулою 20.

Результати калібрування

1 Опис, стан об'єкту калібрування

За результатами зовнішнього огляду та опробування стан визнаний задовільним.

2 Визначення основних параметрів

Первинні дані знаходяться в колонках і строках таблиць під назвою "показання".

Таблиця 2.1 - Вихідні дані для проведення калібрування

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для повимірювань калібрування																
Вихідні дані																
	Дискретність ваг, г (d)	Відхилення маси еталонної гирі від номіналу з серт-та, мг	Розширена невизначеність еталонної гирі з серт-та (U), мг	Температура повітря (t), °C	Відносна вологість повітря (Rh), %	Атмосферний тиск (p), гПа	Густина вологого повітря (ρa), кг/м3	Умова густина повітря (ρ0), кг/м3	Густина виробної гирі (з табл. B7 ДСТУ OIML R 111-1) (ρi), кг/м3	Невизначеність густини виробної гирі (з табл. B7 ДСТУ OIML R 111-1) U(ρi), кг/м3	Густина еталонної гирі (з табл. B7 ДСТУ OIML R 111-1) (ρj), кг/м3	Невизначеність густини еталонної гирі (з табл. B7 ДСТУ OIML R 111-1) U(ρj), кг/м3	Розширена невизначеність вимірювання тиску (U _p), Па	Розширена невизначеність вимірювання температури (U _t), °C	Розширена невизначеність вимірювання вологості (U _h), у %/100	
Г	500	0.001	0.340	0.250	22.6	48.0	993.0	1,164246441	1.2	7950	140	7950	140	18	0.08	0.012
	200	0.00001	0.070	0.100												
	200	0.00001	0.070	0.100												
	100	0.00001	-0.064	0.050												
	50	0.00001	-0.009	0.030												
	20	0.00001	0.033	0.025												
	20	0.00001	0.033	0.025												
	10	0.00001	0.022	0.020												
	5	0.00001	0.038	0.016												
	2	0.00001	0.006	0.012												
	2	0.00001	0.006	0.012												
	1	0.00001	0.014	0.010												
	500	0.00001	0.017	0.008												
	200	0.00001	0.008	0.006												
	200	0.00001	0.008	0.006												
МГ	100	0.00001	0.008	0.005	22.6	48.0	993.0	1,164246441	1.2	7950	140	7950	140	18	0.08	0.012
	50	0.00001	0.003	0.004												
	20	0.00001	0.003	0.003												
	20	0.00001	0.003	0.003												
	10	0.00001	0.004	0.003												
	5	0.00001	0.003	0.002												
	2	0.00001	0.003	0.002												
	2	0.00001	0.003	0.002												
	1	0.00001	0.003	0.002												
	500	0.00001	0.003	0.002												
	200	0.00001	0.003	0.002												
	200	0.00001	0.003	0.002												
	100	0.00001	0.003	0.002												
	50	0.00001	0.003	0.002												
	20	0.00001	0.003	0.002												

Рисунок 3 – Витяг з протоколу, який містить вихідні дані для подальших розрахунків

Наступний блок стосується безпосередньо результатів вимірювань отриманих під час калібрування гир (рис.4), а також розрахунку різниці показів вагів (4), поправки на виштофхувальну силу (6), різниці значення маси (5) та середньої різниці значення мас (7).

Таблиця 2.2 - Результати вимірювань при калібруванні			Виміряне значення, г															Результати обчислень, г																														
Клас калібрування гір за ДСТУ ОІМЛ R 111-1:2008	Номінал маси калібрув. мот. гір (мг), г	Значення маси еталонної гір (мг), г	Цент АВА №1															Цент АВА №2					Цент АВА №3					Цент АВА №4					Цент АВА №5					Різниця показів ваг					Поправка	Різниця значення маси				
			I1.1	I1.1	I2.1	I1.2	I1.2	I2.2	I1.3	I1.3	I2.3	I1.4	I1.4	I2.4	I1.5	I1.5	I2.5	ΔI1	ΔI2	ΔI3	ΔI4	ΔI5	C	Δm1	Δm2	Δm3	Δm4	Δm5	періодичні																			
а	500	500,00034	500,001	500,002	500,001	500,002	500,001	500,000	500,000	500,001	500,000	500,000	500,001	500,000	500,001	500,000	500,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001								0,010	0,000	0,010	0,010	0,010	0,008													
	200	200,00007	200,00013	200,00019	200,00012	200,00013	200,00019	200,00011	200,00013	200,00016	200,00012	200,00010	200,00019	200,00012	200,00013	200,00011	200,00010	0,00066	0,00067	0,00063	0,00068	0,00070								0,00666	0,00067	0,00063	0,00068	0,00070	0,007													
	100	100,00007	100,00009	100,00008	100,00012	100,00012	100,00012	100,00011	100,00009	100,00008	100,00007	100,00008	100,00008	100,00007	100,00007	100,00008	100,00007	-0,00024	-0,00017	-0,00037	-0,00028	-0,00034								-0,00024	-0,00017	-0,00037	-0,00028	-0,00034	-0,0014													
	50	50,9999258	50,99994	50,99993	50,99993	50,99993	50,99993	50,99994	50,99992	50,99992	50,99992	50,99992	50,99992	50,99992	50,99992	50,99992	50,99992	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032								0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032													
	20	20,999991	20,00004	20,00011	20,00014	20,00013	20,00013	20,00014	20,00013	20,00014	20,00013	20,00017	20,00017	20,00017	20,00017	20,00017	20,00017	0,00017	0,00016	0,00015	0,00015	0,00017								0,00017	0,00016	0,00015	0,00015	0,00017	0,00018													
	10	10,000033	10,00003	10,00012	10,00004	10,00003	10,00013	10,00002	10,00001	10,00012	10,00004	10,00002	10,00011	10,00002	10,00001	10,00001	10,00001	0,00009	0,00010	0,00009	0,00009	0,00012								0,00009	0,00010	0,00009	0,00009	0,00012	0,00013													
	5	5,000033	5,00001	5,00011	5,00003	5,00003	5,00014	5,00003	5,00003	5,00012	5,00002	5,00002	5,00013	5,00002	5,00003	5,00010	5,00002	0,00009	0,00011	0,00009	0,00011	0,00009	0,00007								0,00009	0,00011	0,00009	0,00011	0,00007	0,00010												
	2	2,000036	2,00001	2,00009	2,00000	2,00000	2,00006	2,00001	1,99999	2,00007	2,00001	2,00001	2,00007	2,00000	2,00002	2,00009	2,00001	0,00009	0,00005	0,00007	0,00007	0,00006	0,00007								0,00009	0,00005	0,00007	0,00007	0,00006	0,00007												
	1	1,000036	1,00002	1,00008	1,00002	1,00001	1,00002	1,00001	1,00002	1,00007	1,00001	1,00001	1,00007	1,00000	1,00003	1,00008	1,00001	0,00008	0,00004	0,00006	0,00006	0,00007	0,00007								0,00008	0,00004	0,00006	0,00006	0,00007	0,00007												
	б	500	500,00014	1,00001	1,00005	1,00002	1,00007	1,00002	1,00007	1,00002	1,00002	1,00002	1,00002	1,00002	1,00002	1,00002	1,00002	1,00002	0,00004	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005								0,00004	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005												
200		200,00007	0,50000	0,50003	0,50001	0,50001	0,50003	0,50002	0,50003	0,50004	0,50003	0,50001	0,50002	0,50003	0,50003	0,50002	0,50002	0,00002	0,00001	0,00001	0,00000	-0,00001								0,00002	0,00001	0,00001	0,00000	-0,00001	0,00000													
100		100,00007	0,20000	0,20003	0,20000	0,20002	0,20003	0,20002	0,20003	0,20003	0,20002	0,20001	0,20002	0,20003	0,20003	0,20002	0,20002	0,00002	0,00001	0,00001	0,00000	-0,00001								0,00002	0,00001	0,00001	0,00000	-0,00001	0,00000													
50		50,000038	0,10000	0,10002	0,10002	0,10001	0,10002	0,10001	0,10002	0,10001	0,10002	0,10001	0,10001	0,10001	0,10001	0,10001	0,10001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00002								0,00001	0,00001	0,00001	0,00002	0,00000	0,00000													
20		20,000027	0,02000	0,02003	0,02002	0,02002	0,02003	0,02001	0,02002	0,02002	0,02002	0,02001	0,02002	0,02002	0,02003	0,02002	0,02002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002								0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002													
10		10,0000383	0,01000	0,01002	0,01001	0,01002	0,01002	0,01001	0,01002	0,01001	0,01002	0,01001	0,01002	0,01001	0,01001	0,01001	0,01001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00002								0,00001	0,00001	0,00001	0,00002	0,00000	0,00000													
5		5,000027	0,00500	0,00502	0,00501	0,00503	0,00502	0,00501	0,00500	0,00501	0,00500	0,00501	0,00501	0,00500	0,00501	0,00500	0,00500	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00002								0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00002	0,00002													
2		2,000027	0,00200	0,00202	0,00201	0,00202	0,00202	0,00201	0,00201	0,00201	0,00201	0,00201	0,00201	0,00200	0,00202	0,00202	0,00201	0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001								-0,00001	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00001												
1		1,000032	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001								-0,00001	0,00002	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000												
в		500	500,00034	0,21001	0,21001	0,21001	0,21000	0,21001	0,21001	0,21001	0,21001	0,21001	0,21001	0,21001	0,21001	0,21001	0,21000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000								0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000													
	200	200,00034	0,05002	0,05002	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,05001	0,00002	0,00002	0,00001	0,00000	0,00000	0,00002								0,00002	0,00002	0,00001	0,00000	0,00000	0,00002													
	100	100,00034	0,02002	0,02002	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,02000	0,00001	0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001								0,00001	0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001													
	50	50,00033	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00500	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000								0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000													
	20	20,00033	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000								0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000													
	10	10,00033	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000								0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000													
	5	5,00033	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00050	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000								0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000													
	2	2,00033	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020																																			

Рисунок 4 - Витяг з протокола калібрування гир, з результатами вимірювання під час калібрування гир

4.2 Співставлення теоретичних формул з реалізацією в електронному протоколі Excel

Електронний протокол калібрування (Додаток А) повністю реалізує математичну модель, викладену в розділі 3. Нижче наведено ключове співставлення основних формул.

4.2.1 Обчислення різниці показів вагів (цикл АВА)

Теоретична формула (3.4.2.2.1, формула 2):

$$\Delta l_i = l_{t1i} - \frac{l_{r1i} + l_{r2i}}{2}$$

Реалізація в Excel (аркуш «Протокол», рядки 89–113, стовпці з $\Delta l_1 \dots \Delta l_5$):

$$= lt1 - (lr1 + lr2)/2$$

(Для кожного циклу; формули автоматично копіюються вниз по рядках для кожної гирі).

4.2.2 Середня різниця умовного значення маси Δm_c (одна гиря)

Теоретична формула (3.4.2.4.1, формула 7):

$$\Delta \bar{m}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_{ci}$$

Реалізація (колонка "середнє Δm_c "):

$$= AVERAGE(\Delta mc1: \Delta mc5)$$

4.2.3 Поправка на виштовхувальну силу (C)

Теоретична формула (3.4.2.4.1, формула 6):

$$C = \left(\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_r} \right) \approx \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0 \cdot 8000}$$

Реалізація (аркуш «Протокол», колонка «C»):

$$= (1/\rho a - 1/\rho 0) * (1/\rho t - 1/\rho r)$$

(ρa розраховується за формулою CIPM-2007 у відповідній комірці).

4.2.4 Стандартна невизначеність типу А ($u_w(\Delta m_c)$)

Теоретична формула (3.6, формула 12):

$$u_w(\Delta m_c) = \frac{s(\Delta m_{ci})}{\sqrt{n}}$$

Реалізація (Таблиця 2.3):

$$= STDEV.S(\Delta mc1: \Delta mc5)/SQRT(COUNT(\Delta mc1: \Delta mc5))$$

(або STDEV.P залежно від вибору; для класу F1 рекомендовано $n \geq 5$).

4.2.5 Невизначеність еталонної гирі $u(m_{cr})$ (тип B)

Теоретична формула (3.7, формула 16):

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + u_{inst}^2(m_{cr})}$$

Реалізація:

$$= SQRT((U_etalon/2)^2 + u_inst^2)$$

(Дані беруться з аркуша «Дані про РЕ»).

4.2.6 Невизначеність поправки на виштовхувальну силу u_b

Теоретична формула (3.8, формула 19):

$$u_b = |m_{cr}| \cdot \sqrt{u^2(\rho_a) + \left(\frac{u(\rho_t)}{\rho_t}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho_r)}{\rho_r}\right)^2}$$

Реалізація (бюджет невизначеності):

Повністю відтворена в таблиці 2.3 з окремими стовпцями для $u^2(\rho_a)$, u_b тощо.

З таблиці 2.3:

$$= (AG61 * 10^{(-4)})^2 + (AG61 * 10^{(-5)} * (BD61/2))^2 + (AG61 * (-3,4) * 10^{(-3)} * (BG61/2))^2 + (AG61 * 10^{(-2)} * (BJ61/2))^2$$

$$\begin{aligned}
&= ((M90 * (\$AX\$61 - \$AR\$61)/(\$AX\$61 * \$AR\$61))^2) * \$AG\$122 + ((M90 \\
&\quad * (\$AG\$61 - \$AK\$61))^2) * ((\$AU\$61/2)^2)/(\$AR\$61^4) \\
&\quad + (M90^2) * (\$AG\$61 - \$AK\$61) * ((\$AG\$61 - \$AK\$61) - 2 \\
&\quad * (1,2 - \$AK\$61)) * ((\$BA\$61/2)^2)/(\$AX\$61^4)
\end{aligned}$$

4.2.7 Сумарна стандартна невизначеність $uc(mct)$ та розширена $U(mct)$
Теоретичні формули (3.9.5–3.9.6, формули 25 і 27):

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2 + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2 + \dots}$$

$$U(m_{ct}) = k \cdot u_c(m_{ct}) (k = 2)$$

Реалізація:

$$= SQRT(SUMSQ(\text{всі вклади}))$$

$$= 2 * uc_mct$$

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження проблеми калібрування гир у виробничих лабораторіях підприємств та організацій для власних потреб. Основним результатом роботи стала розробка електронного протокола калібрування гир, який забезпечує зручність і легкість обробки результатів вимірювань і розрахунків, а також їх простежуваність до еталонів

Серед ключових аспектів роботи можна виділити систематизацію вимог до калібрування згідно з чинними стандартами, аналіз технічних і метрологічних особливостей гир, розробку алгоритмів оцінки похибок та невизначеності вимірювань та створення практичних рекомендацій щодо проведення калібрування гир.

Основними пропозиціями щодо впровадження результатів дослідження для метрологічних служб підприємств та організацій може бути впровадження і використання розробленого електронного протоколу калібрування гир.

Серед перспектив подальших досліджень галузі калібрування гир можна виділити автоматизацію процесів калібрування гир з використанням сучасних рішень, наприклад, машинного зору при використанні вагів, які не мають інтерфейсу для передачі результатів вимірювань безпосередньо до електронного протоколу.

Практична цінність роботи полягає у можливості її використання для забезпечення єдності вимірювань у різних галузях промисловості, торгівлі та медицини та зручності використання завдяки розробленим електронним протоколам та бюджетам невизначеності, що сприятиме покращенню якості результатів вимірювань та зменшенню трудомісткості розрахунків.

Апробація матеріалів кваліфікаційної роботи була проведена на XXX Міжнародному молодіжному форумі «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА МОЛОДЬ У XXI СТОЛІТТІ», тези доповіді наведені у Додатку Б.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ OIML R 111-1:2008. Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги. — Київ: Держспоживстандарт України, 2008.
2. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>
3. Про затвердження міжповірочних інтервалів законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки: наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1417-16#Text> .
4. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
5. OIML R 76-1:2006. Неавтоматичні зважувальні прилади. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги. — Париж : Міжнародна організація законодавчої метрології, 2006.
6. OIML D 28:2004. Conventional value of the result of weighing in air. — Париж : OIML, 2004.
7. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2019. Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
8. ДСТУ ГОСТ 7328:2003. Гирі. Загальні технічні умови. — [Чинний до 2008 р.].
9. Про затвердження переліку категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці : постанова Кабінету Міністрів України від 04.06.2015 № 374 // Офіційний вісник України. — 2015. — № 46. — Ст. 1478.
10. Про затвердження Порядку встановлення міжповірочних інтервалів для законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки за категоріями:

постанова Кабінету Міністрів України від 16.12.2015 № 1195 // Офіційний вісник України. — 2015. — № 102. — Ст. 3521.

Умови проведення калібрування					
t, °C	22,6	RH, %	48,0±0,5	p, rHa	993

Допоміжне обладнання			
Найменування, тип, номер	Інформація щодо калібрування		
Термомінометр / барометр Greisinger GFTB 200, зав. №84906770	Сертифікат калібрування №	UA/36/250207/000294	від 07.02.2025
	видає	ДП «УКРМЕТРЕСТСТАНДАРТ»	
	Сертифікат калібрування №	UA/39/250217/0153	від 17.02.2025
	видає	ДП «УКРМЕТРЕСТСТАНДАРТ»	
	Сертифікат калібрування №	UA/42/50218/0408	від 18.02.2025
	видає	ДП «УКРМЕТРЕСТСТАНДАРТ»	

2 Визначення основних параметрів
Первинні дані знаходяться в колонках і строках таблиць, під назвою "показання".

[illegible]

Таблиця 2.2 - Результати вимірювань при калібруванні

Клас калібрувальної гирі за ДСТУ ОІМЛ R 111-1:2008	Номинальна маса калібрувальної гирі (m0), г	Значення маси еталонної гирі (mси), г	Виміряні значення, г															Результати обчислень, г												
			Цикл АВА №1			Цикл АВА №2			Цикл АВА №3			Цикл АВА №4			Цикл АВА №5			Різниця показів ваг					Поправка	Різниця значення маси						
			h1 1	h1 1	h2 1	h1 2	h1 2	h2 2	h1 3	h1 3	h2 3	h1 4	h1 4	h2 4	h1 5	h1 5	h2 5	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5		C	Δмс1	Δмс2	Δмс3	Δмс4	Δмс5	середнє Δмс
F1	500	500.00034	500.001	500.002	500.001	500.002	500.001	500.000	500.000	500.001	500.000	500.000	500.001	500.000	500.000	500.001	500.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0	0.0010	0.0000	0.0010	0.0010	0.0010	0.0008	
	200	200.00007	200.00013	200.00079	200.00012	200.00013	200.00079	200.00011	200.00013	200.00076	200.00012	200.00010	200.00079	200.00012	200.00013	200.00081	200.00010	0.00066	0.00067	0.00063	0.00068	0.00070		0.00066	0.00067	0.00063	0.00068	0.00070	0.00067	
	200	200.00007	200.00000	200.00009	200.00085	200.00012	200.00010	200.00081	200.00009	200.00008	200.00082	200.00008	200.00008	200.00079	200.00001	200.00005	200.00076	-0.00034	-0.00037	-0.00037	-0.00035	-0.00034		-0.00034	-0.00037	-0.00037	-0.00035	-0.00034	-0.00035	
	100	99.999936	99.99994	100.00045	99.99993	99.99993	100.00042	99.99994	99.99990	100.00043	99.99992	99.99990	100.00041	99.99992	99.99992	100.00041	99.99991	0.00052	0.00049	0.00052	0.00050	0.00050		0.00052	0.00049	0.00052	0.00050	0.00050	0.00050	
	50	49.999991	50.00004	50.00021	50.00004	50.00003	50.00019	50.00004	50.00003	50.00018	50.00002	50.00002	50.00001	50.00017	50.00002	50.00002	50.00019	50.00002	0.00017	0.00016	0.00015	0.00015		0.00017	0.00017	0.00016	0.00015	0.00015	0.00017	0.00016
	20	20.000012	20.00003	20.00012	20.00004	20.00003	20.00013	20.00002	20.00001	20.00012	20.00004	20.00002	20.00011	20.00002	20.00001	20.00013	20.00001	0.00009	0.00010	0.00009	0.00009	0.00012		0.00009	0.00010	0.00009	0.00009	0.00012	0.00010	
	20	20.000012	20.00004	20.00012	20.00003	20.00003	20.00010	20.00003	20.00004	20.00008	20.00003	20.00002	20.00001	20.00001	20.00008	20.00008	20.00001	0.00007	0.00007	0.00005	0.00006	0.00007		0.00007	0.00007	0.00005	0.00006	0.00007	0.00008	
	10	10.000022	10.00003	10.00012	10.00004	10.00004	10.00012	10.00003	10.00004	10.00014	10.00004	10.00004	10.00014	10.00004	10.00004	10.00011	10.00004	0.00009	0.00009	0.00010	0.00010	0.00009		0.00009	0.00009	0.00010	0.00010	0.00009	0.00009	
	5	5.000038	5.00001	5.00003	5.00003	5.00014	5.00003	5.00012	5.00002	5.00013	5.00002	5.00013	5.00002	5.00010	5.00002	5.00009	0.00009	0.00011	0.00009	0.00011	0.00007	0.00009		0.00011	0.00009	0.00011	0.00007	0.00010		
	2	2.000006	2.00000	2.00009	2.00000	2.00001	2.00006	2.00001	1.99998	2.00007	2.00001	2.00001	2.00001	2.00002	2.00000	2.00002	2.00008	2.00001	0.00000	0.00005	0.00007	0.00007		0.00000	0.00005	0.00007	0.00007	0.00006	0.00007	
	2	2.000006	2.00002	2.00008	2.00002	2.00001	2.00008	1.99998	2.00000	2.00007	1.99998	2.00000	2.00007	1.99998	2.00000	2.00007	2.00000	2.00006	0.00006	0.00008	0.00008	0.00008		0.00006	0.00008	0.00008	0.00008	0.00007	0.00007	
	1	1.000014	1.00001	1.00005	1.00001	1.00002	1.00007	1.00002	1.00002	1.00007	1.00002	1.00002	1.00007	1.00002	1.00002	1.00002	1.00008	1.00002	0.00004	0.00005	0.00005	0.00005		0.00004	0.00005	0.00005	0.00005	0.00006	0.00005	
	500	500.0000171	0.50000	0.50003	0.50001	0.50001	0.50003	0.50002	0.50003	0.50004	0.50003	0.50001	0.50002	0.50003	0.50001	0.50002	0.50002	0.50002	0.00002	0.00001	0.00001	0.00000		-0.00001	0.00002	0.00001	0.00001	0.00000	-0.00001	0.00001
M2	200	200.0000081	0.20000	0.20003	0.20000	0.20002	0.20003	0.20002	0.20003	0.20003	0.20002	0.20000	0.20001	0.20002	0.20002	0.20004	0.20001	0.20000	0.00003	0.00001	0.00001	0.00001	-0.00001	0.00003	0.00001	0.00001	0.00000	-0.00001	0.00001	
	200	200.0000081	0.20000	0.20003	0.20002	0.20002	0.20003	0.20001	0.20002	0.20002	0.20002	0.20001	0.20002	0.20001	0.20002	0.20002	0.20003	0.20000	0.00002	0.00002	0.00000	0.00001	0.00002	0.00002	0.00002	0.00000	0.00001	0.00002	0.00001	
	100	100.0000083	0.10000	0.10002	0.10001	0.10002	0.10002	0.10001	0.10001	0.10002	0.10001	0.10001	0.10001	0.10001	0.10001	0.10001	0.10001	-0.00001	-0.00001	0.00002	0.00002	0.00000	0.00001	0.00001	-0.00001	0.00002	0.00000	0.00000		
	50	50.0000027	0.05002	0.05002	0.05001	0.05003	0.05002	0.05001	0.05001	0.05000	0.05001	0.05000	0.05001	0.05001	0.05001	0.05000	0.05002	0.05001	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00002	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00001		
	20	20.0000027	0.02000	0.02002	0.02001	0.02002	0.02002	0.02001	0.02001	0.02001	0.02001	0.02001	0.02001	0.02001	0.02002	0.02002	0.02001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001			
	20	20.0000027	0.02001	0.02000	0.02002	0.02001	0.02002	0.02002	0.01999	0.02000	0.02001	0.02001	0.02001	0.02001	0.02001	0.02000	0.02001	-0.00001	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	-0.00001	0.00002	0.00000	0.00001	0.00000		
	10	10.0000036	0.01001	0.01001	0.01001	0.01000	0.01000	0.01001	0.00999	0.01001	0.01001	0.01001	0.01001	0.01002	0.01002	0.01000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00001	0.00000	0.00001	0.00000		
	5	5.0000034	0.00500	0.00502	0.00501	0.00503	0.00501	0.00501	0.00501	0.00500	0.00501	0.00500	0.00501	0.00501	0.00502	0.00502	-0.00001	0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002	-0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000		
	2	2.0000032	0.00200	0.00202	0.00200	0.00200	0.00200	0.00201	0.00200	0.00201	0.00200	0.00201	0.00200	0.00201	0.00200	0.00199	0.00002	0.00000	-0.00001	0.00002	0.00003	0.00003	0.00002	0.00000	-0.00001	0.00002	0.00003	0.00001		
	2	2.0000032	0.00200	0.00200	0.00200	0.00199	0.00199	0.00201	0.00201	0.00200	0.00201	0.00198	0.00202	0.00200	0.00199	0.00200	0.00201	0.00000	-0.00001	-0.00001	0.00003	0.00000	0.00000	-0.00001	-0.00001	0.00003	0.00000	0.00000		
	1	1.0000026	0.00100	0.00101	0.00101	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00100	0.00101	0.00101	0.00098	0.00098	0.00099	0.00001	0.00000	0.00000	0.00002	-0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00002	-0.00001	0.00000		

Таблиця 2.3 - Розрахунок невизначеності калібрування

Розрахунок невизначеності										
Значення маси калібрувальної гирі (mси), г	Відхилення від номінальної маси, мг	Границя допустимої похибки (з табл. 1 ДСТУ ОІМЛ R 111-1), мг	Відповідність гирі класу точності	Невизначеність, проаналізована за умови, мг (uA)	Невизначеність еталонної гирі, мг (u(mci))	Оцінена дисперсія густини повітря, u2(pа)	Невизначеність поправки на виступаючу частину, u2(b)	Невизначеність ваги (дискретності), мг (u(mci))	Сумарна стандартна невизначеність, u(mci)	Розширена невизначеність, U(mci), мг
500.00114	1.14	2.5	NI	0.2	0.19	0.0000000054	0.00000000078	0.4082	0.493	0.986
200.00074	0.739	1	Так	0.009924717	0.08			0.0041	0.077	0.154
199.99972	-0.283	1	Так	0.008	0.08			0.0041	0.077	0.154
100.00044	0.439	0.5	NI	0.006442049	0.04			0.0041	0.039	0.078
50.00015	0.152	0.3	Так	0.003674235	0.02			0.0041	0.024	0.047
20.00013	0.132	0.25	Так	0.00204837	0.02			0.0041	0.020	0.041
20.00010	0.095	0.25	Так	0.005385165	0.02			0.0041	0.020	0.041
10.00011	0.114	0.20	Так	0.003391165	0.02			0.0041	0.016	0.032
5.00013	0.134	0.16	NI	0.006595453	0.01			0.0041	0.014	0.029
2.00008	0.075	0.12	Так	0.006595453	0.01			0.0041	0.012	0.024
2.00008	0.078	0.12	Так	0.003391165	0.01			0.0041	0.011	0.021
1.00008	0.064	0.10	Так	0.003162278	0.01			0.0041	0.009	0.018
500.00702	0.00702	0.08	Так	0.006819091	0.01			0.0041	0.010	0.020
200.00701	0.00701	0.08	Так	0.00663325	0.00			0.0041	0.009	0.018
200.01301	0.01301	0.06	Так	0.003741657	0.00			0.0041	0.007	0.014
100.00501	0.00501	0.05	Так	0.004743416	0.00			0.0041	0.007	0.015
50.00600	0.00600	0.04	Так	0.002915476	0.00			0.0041	0.006	0.012
20.00500	0.00500	0.03	NI	0.002738613	0.00			0.0041	0.005	0.011
20.00400	0.00400	0.03	NI	0.00587918	0.00			0.0041	0.007	0.015
10.00200	0.00200	0.03	NI	0.003391165	0.00			0.0041	0.006	0.011
5.00500	0.00500	0.02	NI	0.0041833	0.00	0.0041	0.006	0.012		
2.01100	0.01100	0.02	NI	0.00678233	0.00	0.0041	0.008	0.016		
2.00200	0.00200	0.02	NI	0.007348469	0.00	0.0041	0.009	0.017		
1.00400	0.00400	0.02	NI	0.004301163	0.00	0.0041	0.006	0.012		

УДК 006.91:53.08

**ОПТИМАЛЬНА ПРОЦЕДУРА ПРОМІЖНИХ ПЕРЕВІРЯНЬ,
КАЛІБРУВАНЬ ГИР У ЛАБОРАТОРІЇ**

Михайлюков М.В.

e-mail: mykhailo.mykhailiukov@nure.ua

Науковий керівник – PhD, Семеніхін В.С.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ІВТ
м. Харків, Україна

This work is devoted to the creation of a procedure for intermediate verifications or calibrations of weights in measuring, testing or calibration laboratories of enterprises and organizations, optimal in terms of labor intensity and ensuring the reliability of results. The main regulatory acts and standards relating to the performance of calibrations and intermediate verifications were considered, and the requirements of the DSTU OIML R 111-1:2008 [1] standard for calibration of weights were analyzed, on the basis of which the procedure for intermediate verifications, calibrations of weights in the laboratory was developed.

В Україні застосування засобів вимірювань (далі – ЗВ) та здійснення лабораторної діяльності у частині вимірювань регламентується Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [2], п.2 статті 7 якого каже, що: «Результати вимірювань можуть бути використані у сфері законодавчо регульованої метрології за умови, що для таких результатів відомі відповідні характеристики похибок або невизначеність вимірювань» [2], тобто ЗВ, які застосовуються для отримання відповідного результату вимірювання, в даному випадку гирі, для забезпечення єдності вимірювань та метрологічної простежуваності повинні мати також відомі характеристики похибок та невизначеності вимірювань, які визначаються за результатами їх повірки або калібрування.

Міжповірочний інтервал для гир класів точності М – 2 роки та для усіх інших гир – 1 рік [3], міжкалібрувальний інтервал для гир встановлюється власником ЗВ, орієнтуючись на рекомендації виробника, нормативно-правові акти або іншу достовірну інформацію і може складати 2 роки і більше. Виходячи з цього, п.6.4.10 стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» [4] говорить нам, що для підтримання довіри до працездатності обладнання та достовірності результатів необхідно виконувати проміжні перевіряння відповідно до певної процедури.

Для розробки процедури проміжних перевірянь гир було проаналізовано стандарт ДСТУ OIML R 111-1:2008 [1], який висуває вимоги до гир, а також в якому наведено процедуру їх калібрування. Для процедури проміжних перевірянь гир доцільно оптимізувати процедуру калібрування наведену у стандарті [1] з точки зору трудомісткості та простоти виконання,

оскільки процедура проміжних перевірянь не є основною діяльністю для персоналу вимірювальних та випробувальних лабораторій підприємств.

По-перше, згідно п. С.3 стандарту [1] було обрано схему зважування, а саме – схему «безпосереднього звіряння», оскільки вона більш проста для виконання і обробки результатів ніж процедура «калібрування вниз».

По-друге, з трьох можливих циклів зважування згідно п. С.4 [1], з огляду на зменшення кількості вимірювань і відповідно трудомісткості, для процедури проміжних перевірянь обрали цикл зважування АВА для гір класів точності Е та F, і цикл $AB_1 \dots B_n A$ для класів точності М, якщо звіряють кілька (не більше 5) випробних гір однакової номінальної маси з однією еталонною.

Кількість циклів зважування для гір класів точності Е та F₁ обрали 5, а для класів точності F₂ та М – 3 цикли зважування, оскільки це мінімальна кількість вимірювань необхідна для розрахунку стандартної невизначеності процесу зважування (невизначеності типу А) згідно п. С.6.1 стандарту [1].

Невизначеність поправки внеску на виштовхувальну силу для класів точності М не розраховуємо, оскільки вона нехтовно мала, для інших класів точності розраховуємо за формулою С.6.3-1 наведеною у стандарті [1], при цьому густину повітря ми не вимірюємо, а обчислюємо як значення для висоти розташування лабораторії над рівнем моря за формулою Е.3-2 [1], а невизначеність густини повітря оцінюємо за формулою С.6.3-2 [1], значення густини еталонної і випробної гіри і невизначеності густини ми також не визначаємо, а беремо з таблиці В.7 [1] для відповідного матеріалу гір. Всі інші розрахунки проводяться відповідно до п. С.6 стандарту [1].

Таким чином ми розробили процедуру проведення проміжного перевіряння гір, для якої обрали оптимальні процеси вимірювань та розрахунків з точки зору простоти виконання і трудомісткості, і яка в той же час повністю відповідає стандарту і забезпечує достовірність результатів.

Список використаних джерел:

1. ДСТУ OIML R 111-1:2008. Гирі класів точності E1, E2, F1, F2, M1, M2, M3. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги. Київ: Держспоживстандарт України, 2008.
2. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>.
3. Про затвердження міжповірочних інтервалів законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки: наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1417-16#Text>.
4. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.