

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)

Кафедра Метрології та технічної експертизи
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Дослідження методики калібрування кінцевої міри довжини
(тема)

Виконала:

студентка 2 курсу, групи МВТ_М-18-1

Шихрагімова Т. В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Метрологія та
вимірювальна техніка
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Семенець В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри МТЕ

_____ (підпис)

Сергієнко М.П.
(прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інфокомунікацій
(повна назва)

Кафедра метрології та технічної експертизи
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)

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

Освітня програма Метрологія та вимірювальна техніка
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Шихрагимовій Тетяні Валеріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методики калібрування кінцевої міри довжини
затверджена наказом по університету від 31 жовтня 2019 р. № 1604 Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____

3.1 Довжина кінцевої міри довжини, що калібрується 50 мм

3.2 Дрейф еталонної кінцевої міри довжини ± 30 нм

3.3 Температура при калібруванні 20 °С

3.4 Коефіцієнт лінійного розширення кінцевої міри довжини $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

3.5 Відхилення середньої температури вимірювань від встановленої оцінюється
максимально як $\pm 5,0$ °С.

3.6 Розширена невизначенність еталонної кінцевої міри довжини ± 30 нм

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____

4.1 Кінцеві міри довжини та їх повірка (калібрування)

4.2 Методи оцінювання невизначеності вимірювань оцінок вхідних величин

4.3 Аналіз даних, отриманих під час калібрування КМД довжиною 50 мм

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням таблиць, графіків, плакатів, ілюстрацій (слайдів) _____
5.1 Мета роботи. 5.2 . 5.3 . 5.4 . 5.5. 5.6. 5.7. 5.8. 5.9. 5.10. 5.11. 5.12. 5.13. 5.14 Висновки по роботі.

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми та методів її вирішення	04.11.19-10.11.19	
2	Розробка основної частини	11.11.19-30.11.19	
3	Написання пояснювальної записки	01.12.19-05.12.19	
4	Виконання графічної частини	05.12.19-09.12.19	
5	Представлення закінченої атестаційної роботи на кафедру	10.12.19	

Дата видачі завдання 04 листопада 2019 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Семенець В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 60 с., 14 рис., 15 табл., 29 джерел.

Мета роботи – вдосконалення методики калібрування кінцевої міри довжини шляхом розробки процедури оцінювання невизначеності вимірювань.

У роботі розглядаються кінцеві міри довжини, матеріали, з яких їх виготовляють, притирання, метрологічні вимоги, операції, умови, методи та засоби повірки/калібрування КМД.

Розглянута класифікація невизначеності вимірювань, та причини і джерела невизначеності вимірювань. Досліджена методика калібрування та розроблена процедура оцінювання невизначеності вимірювань під час калібрування кінцевої міри довжини, яка виконується методом порівняння, використовуючи компаратор довжини.

Результати роботи можуть бути використані в калібрувальних лабораторіях, акредитованих на виконання вимог стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 [11].

КІНЦЕВА МІРА ДОВЖИНИ, КАЛІБРУВАННЯ, МЕТОДИКА
КАЛІБРУВАННЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ, БЮДЖЕТ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.

ABSTRACT

Explanatory note contains: 60 p., 14 fig., 15 tabl., 29 sources.

The purpose of the work is to improve the method of calibration of a gage block by developing a procedure for measurement uncertainty. The types of gage blocks, their materials, grinding, metrological requirements, operations, conditions, methods and techniques of their verification/calibration are considered.

The classification of measurement uncertainty and their causes and sources are described. The method of calibration and the procedure of measurement uncertainty evaluation at a gage block calibration, performed by the method of comparison using a length comparator, are investigated.

The results of the work can be used in calibration laboratories accredited to compliance of the standard DSTU ISO/IEC 17025: 2017 [11] requirements.

GAGE BLOCK, CALIBRATION, CALIBRATION PROCEDURE,
MEASUREMENT UNCERTAINTY, UNCERTAINTY BUDGET.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	7
1 КІНЦЕВІ МІРИ ДОВЖИНИ І ЇХ ПОВІРКА (КАЛІБРУВАННЯ) ..	9
1.1 Точність кінцевих мір довжини	10
1.2 Матеріали КМД	14
1.3 Притирання	19
1.4 Метрологічні вимоги КМД	21
1.5 Повірка та калібрування кінцевих мір довжини	24
1.6 Операції та умови повірки/калібрування КМД	29
1.7 Методи та засоби повірки/калібрування КМД	30
1.8 Оформлення результатів	32
2 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	
ВІМІРЮВАННЯ ОЦІНОК ВХІДНИХ ВЕЛИЧИН	34
2.1 Загальні положення	34
2.2 Класифікація невизначеності вимірювань	38
2.3 Метод А для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання	41
2.4 Метод Б для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання	43
2.5 Процедура оцінки невизначеності вимірювання, пов'язаної з оцінкою вихідної величини	45
3 АНАЛІЗ ДАНИХ, ОТРИМАННИХ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ КМД З НОМІНАЛЬНОЮ ДОВЖИНОЮ 50 ММ	52
ВИСНОВОК	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	58
ДОДАТОК А	60

ВСТУП

В практичному житті людина всюди має справу з вимірами. Вимірювання має велике значення в сучасному суспільстві. Вони служать не тільки основою науково–технічних знань, але мають першорядне значення для обліку матеріальних ресурсів і плануванням, для внутрішньої і зовнішньої торгівлі, для забезпечення якості продукції, взаємозамінності вузлів і деталей і вдосконалення технології, для забезпечення праці та інших видів людської діяльності.

Якість продукції, що випускається на машинобудівних підприємствах залежить від кількості та якості вимірювань, за допомогою яких контролюються технологічні параметри виробничих процесів, параметри, характеристики, властивості отриманих виробів. В машинобудівництві до 15 % трудових витрат припадає на виконання лінійних і кутових вимірів, які забезпечують якість, надійність і взаємозамінність виробів [20].

Сучасне машинобудування характеризується:

- безперервним збільшенням потужностей і продуктивності машин;
- постійним вдосконаленням конструкцій машин і інших виробів;
- підвищенням вимог до точності виготовлення машин;
- зростанням механізації та автоматизації виробництва.

Для успішного розвитку машинобудування за цими напрямками велике значення має організація виробництва машин та інших виробів на основі взаємозамінності і стандартизації.

У загальному випадку контролю лінійних розмірів в залежності від поставленого завдання передбачається відповідальність перед дві різні цілі. Для досягнення однієї з них в результаті вимірювання визначають розмір деталі, що контролюється в абсолютних величинах. Для досягнення іншої мети визначають розмір деталі, що контролюється в межах запропонованих для неї граничних відхилень і за результатами вимірювання відносять деталь

до придатним або бракують її. Типовим, широко поширеним випадком дwoякою мети вимірювання в машинобудівництві є застосування плоскопаралельних кінцевих мір довжини по класах і розрядах [21].

Кінцеві міри довжини (КМД) давно застосовують для точних вимірювань лінійних розмірів, як на виробництві, так і в лабораторіях і вважають найнадійнішим і точним засобом вимірювань. Однак останнім часом з появою електронних приладів, безконтактних лазерних інтерферометрів, довгих предметів, висотомірів, координатно-вимірювальних машин та інших приладів для абсолютних вимірювань застосування, призначення і роль кінцевих мір довжини при технічних вимірах істотно змінилися.

Стандарт ISO/IEC 17025 [14] визнає міжнародне визнання результатів випробування і калібрування лабораторіями, які отримали акредитацію від органів, які уклали угоду про взаємне визнання (MRA) з аналогічними органами інших країн. ЗВТ, які використовуються в таких лабораторіях повинні підлягати періодичному калібруванню. Ця вимога також відноситься до кінцевих мір довжини, які широко застосовуються в діяльності зазначених лабораторіях. При цьому, згідно ISO/IEC 17025 [14], для акредитованих випробувальних та калібрувальних лабораторій необхідно розробляти процедури оцінки невизначеності вимірювань.

Метою даної роботи є вдосконалення методики калібрування кінцевої міри довжини шляхом розробки процедури оцінювання невизначеності вимірювань.

1 КІНЦЕВІ МІРИ ДОВЖИНИ І ЇХ ПОВІРКА (КАЛІБРУВАННЯ)

Кінцева міра довжини (КМД, плоскопаралельні кінцеві міри, плитки Йогансона) – зразкова міра довжини (еталон) від 0,5 до 1000 мм, виконана у формі прямокутного паралелепіпеда або круглого циліндра, з нормованим розміром між вимірювальними площинами, наведена на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Кінцева міра довжини

Кінцеві міри застосовують для зберігання та матеріального відтворення Державного первинного еталона одиниці довжини, для установки приладів на нуль при відносних вимірах, для безпосередніх вимірювань розмірів виробів, а також для особливо точних розмічальних робіт і налагодження верстатів. Головною перевагою КМД є те, що вони є точними матеріальними носіями розміру, КМД зберігають розмір і форму протягом багатьох років.

Кінцеві міри, які застосовуються для механізації тваринницьких ферм вимірювальних засобів, називають зразковими [19].

Кінцеві міри, що застосовують для вимірювання розмірів виробів для розмічальних робіт і т.п., називають робочими.

1.1 Точність кінцевих мір довжини

Велика розмаїтість в застосуванні мір викликає необхідність в мірах різної точності, тому введено їх поділ на класи (в залежності від точності виготовлення і області застосування).

Клас точності кінцевих мір визначається точністю їх виготовлення: величиною відхилення серединної довжини заходів від номінального розміру, відхилення їх від плоскопаралельності і якістю притирання.

Технічні вимоги, форма і розміри кінцевих мір, їх комплектування в набори, класифікація їх по точності і правила механізації тваринницьких ферм встановлені ГОСТ 9038-90 [15], міжнародним стандартом ISO 3650: 1998 [1], а також Європейським стандартом EN ISO 3650: 1998 [16].

Особливістю стандарту ISO 3650 є:

- введення нової системи класів точності КМД (зокрема скасування класу 00);
- введення вимог, що стосуються похибки вимірювань при декларуванні відповідності згідно ISO 14253-1:1998 [17], тобто стосуються гранично заданого допуску;
- перегляд деяких визначень і позначень у відповідності із існуючими в даний час рекомендаціями.

Згідно ISO 3650:1998 [1] встановлено чотири класи точності (допуску) КМД:

- КМД класу точності 2 зазвичай використовують як «Еталони робочі» в вимірювальних лабораторіях для установки приладів та інструментів при відносних вимірах і їх калібрування, а також для настройки контрольних пристосувань і верстатів;

– КМД класу точності 1 в основному використовують як «Еталони робочі» в вимірювальних лабораторіях і контрольних пунктах для калібрування приладів та інструментів і для точних вимірювань;

– КМД класу точності 0 використовують в якості «Вихідного еталона» (зразкового засобу) в калібрувальних і вимірювальних лабораторіях в термостатированих приміщеннях для механізації тваринницьких ферм КМД, приладів, інструментів і калібрів і для виконання дуже точних вимірювань;

– КМД класу точності К використовують в якості «Вихідного еталона» (зразкового засобу) в калібрувальних і вимірювальних лабораторіях державних метрологічних інститутів і сертифікованих центрів для механізації тваринницьких ферм КМД, еталонів довжини, приладів, інструментів і калібрів. КМД класу точності К є найточнішим еталоном.

Під розміром плоскопаралельної кінцевої міри довжини (рис. 1.2) розуміється її серединна довжина l_c , яка визначається довжиною перпендикуляра, опущеного з середини однієї з вимірювальних поверхонь заходи на протилежну вимірювальну поверхню. Номінальна довжина l_n , серединна довжина l_c .

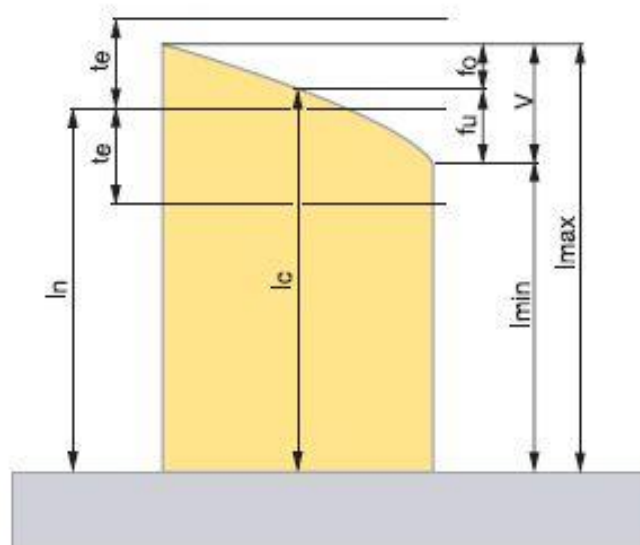


Рисунок 1.2 – Розмір плоскопаралельної кінцевої міри довжини

Довжина плоскопаралельної кінцевої міри довжини в даній точці визначається довжиною перпендикуляра, опущеного з даної точки на протилежну вимірювальну поверхню.

Найбільша по абсолютній величині позитивна або від'ємна різниця між довжиною міри в будь-якій точці і серединної її довжиною l_c визначає граничне відхилення довжини t_v (плоскопаралельністю міри), причому зона шириною 0,5-2,0 мм уздовж країв вимірювальної поверхні (рис. 1.3) до уваги не береться.

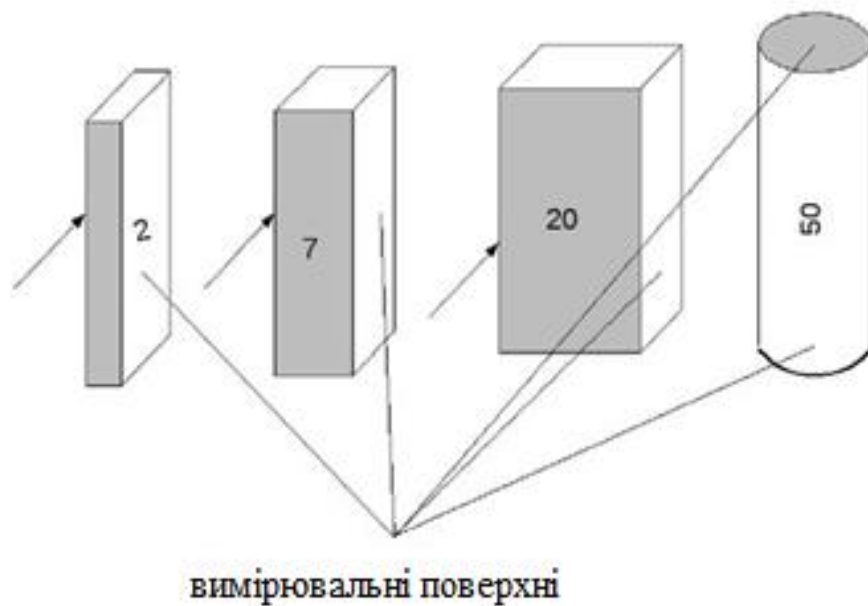


Рисунок 1.3 – Вимірювальні поверхні КМД

Граничні відхилення довжини l_n в будь-якому місці номінального розміру в залежності від класу точності згідно ISO 3650:1998 вказані в табл. 1.1. Робочі (вимірювальні) поверхні притирають (полірують) і на краях виконують округлені фаски, Це забезпечує притирання мір при прикладанні або насування однієї кінцевої міри на іншу.

Допуски площинності t_f мір в залежності від класу точності згідно ISO 3650:1998 вказані в табл. 1.2.

Таблиця 1.1 – Граничні відхилення довжини l_n

Номинальный диапазон l_n , мм	Клас точності К, мкм	Клас точності 0, мкм	Клас точності 1, мкм	Клас точності 2, мкм
0,5 – 10	0,2	0,12	0,2	0,45
10 – 25	0,3	0,14	0,3	0,60
25 – 50	0,4	0,20	0,4	0,80
50 – 75	0,5	0,25	0,5	1,00
75 – 100	0,6	0,30	0,6	1,20
100 – 150	0,8	0,40	0,8	1,60
150 – 200	1,0	0,50	1,0	2,00
200 – 250	1,2	0,60	1,2	2,40
250 – 300	1,4	0,70	1,4	2,80
300 – 400	1,8	0,90	1,8	3,60
400 – 500	2,2	1,10	2,2	4,40
500 – 600	2,6	1,30	2,6	5,00
600 – 700	3,0	1,50	3,0	6,00
700 – 800	3,4	1,70	3,4	6,50
800 – 900	3,8	1,90	3,8	7,00
900 – 1000	4,2	2,0	4,2	8,00

Таблиця 1.2 – Допуски площинності t_f мір в залежності від к.т.

Номинальный диапазон l_n , мм	Клас точності К, мкм	Клас точності 0, мкм	Клас точності 1, мкм	Клас точності 2, мкм
0,5 – 150	0,05	0,10	0,15	0,25
150 – 500	0,10	0,15	0,18	0,25
500 – 1000	0,15	0,18	0,2	0,25

1.2 Матеріали КМД

Кінцеві міри довжини, які виготовляються з хромової сталі наведені на рисунку 1.4, з високою якістю обробки вимірювальних поверхонь і високим притиранням (зусилля зчеплення становить від 3 до 8 кгс), мають відносно низьку зносостійкість.

Кінцеві міри довжини, виконані з високоміцного твердого сплаву наведені на рисунку 1.5, по зносостійкості в 2,5-3 рази перевершують міри, виготовлені з хромової сталі. Візуально твердосплавні міри темно сірі, добре відрізняються від сталевих і по масі помітно важче.



Рисунок 1.4 – КМД, які виготовлені з хромованої сталі

Зарубіжні виробники виготовляють кінцеві міри з кераміки (алюмооксид, двоокис цирконію, карбід вольфраму ...), які наведені на рисунку 1.6, вони відрізняються високою зносостійкістю (в 6-10 разів перевершують сталеві), практично не схильні до корозії, мають низьку теплопровідність (знижується температурна похибка), істотно легше сталевих, не намагнічуються. Вартість керамічних мір приблизно в 3-5 разів вище сталевих. Різні матеріали мають неоднакові ступеня лінійного

температурного розширення, у сталевих мірах 11,5-13 мкм на градус на метр, у твёрдосплавних 4,5 мкм на градус на метр і у керамічних 9,7 мкм на градус на метр.



Рисунок 1.5 – КМД, які виготовлені з твёрдих сплавів



Рисунок 1.6 – КМД, які виготовлені з кераміки

Порівняння характеристик КМД зі сталі і кераміки приведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння характеристик КМД

Характеристика матеріала	Сталь	Цирконієва кераміка
Твердість по Віккерсу, HV	800	1350
Коефіцієнт теплового лінійного розширення, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	11,5-13	$9,7 \pm 0,5$
Спротив вигину, Мпа	1960	1270
Число Пуассона	0,3	0,3
Маса, г/см^3	7,8	6,0
Модуль поздовжньої пружності, Н/мм^2	206000	206000
Теплопровідність, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	54,4	2,9

Виходячи з табл. 1.3 бачимо, що керамічні і сталеві міри мають майже однаковий коефіцієнт теплового лінійного розширення, і це робить їх взаємозамінними, їх можна використовувати для складання одного блоку.

Таким чином, керамічні і сталеві міри надійно забезпечують єдність вимірювання в машинобудівництві.

Сталеві міри чутливі до зміни температури, в тому числі нагріваються від рук оператора. Зміна розміру КМД довжиною 100 мм від рук оператора наведена на рисунку 1.7.

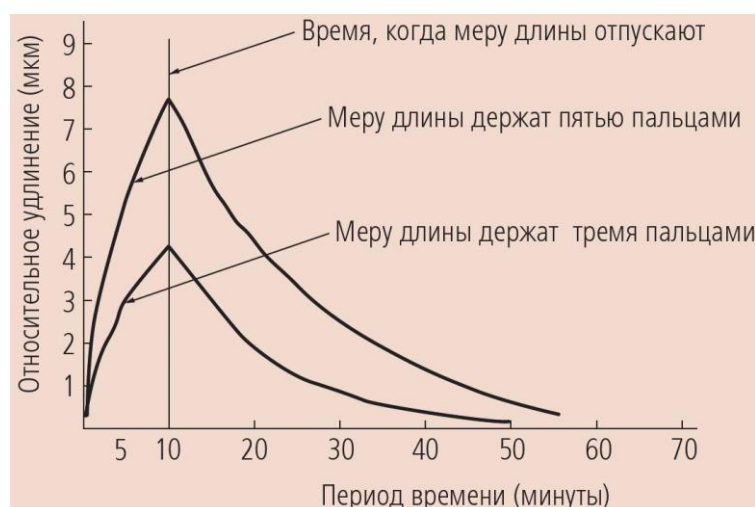


Рисунок 1.7 – Зміна розміру КМД довжиною 100 мм від рук оператора

КМД, виготовлені з цирконієвої кераміки, виключно стійкі до зносу і подряпин робочих поверхонь. Кераміка не схильна до корозії, тому на відміну від сталевих і твердосплавних керамічні КМД не бояться вологих рук контролера. Керамічні КМД мають найтриваліший термін служби і найбільшу стабільність в порівнянні з мірами з інших матеріалів. Графік зносостійкості КМД з різних матеріалів наведений на рисунку 1.8.

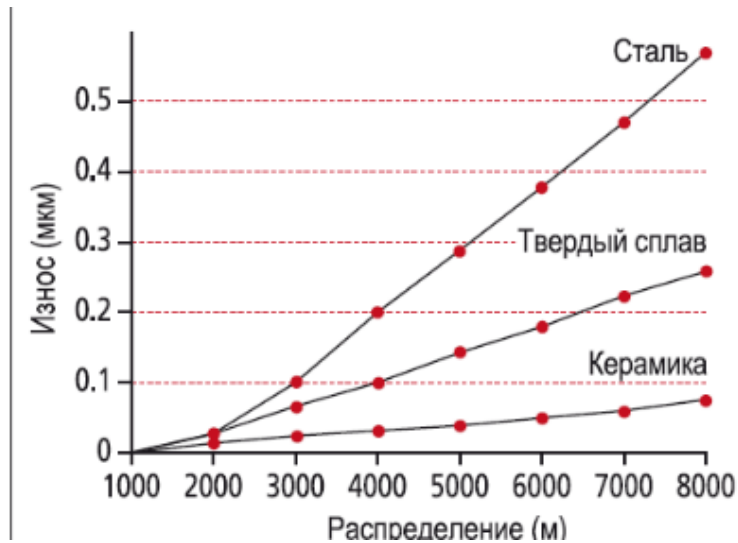


Рисунок 1.8 –Графік зносостійкості КМД з різних матеріалів

1.2 Застосування КМД

Кінцеві міри випускають у вигляді наборів, упакованих в дерев'яні або пластмасові футляри, в яких кожній окремій міру відведено своє місце, з відповідною вказівкою номінального розміру. Градація (крок) розмірів кінцевих мір в наборах – від 0,001, потім 0,01; 0,1; 0,5; 1 і 10 мм, що практично дозволяє скласти будь-який розмір з точністю до 1 мкм. При наборі кінцевих мір в блоки потрібно прагнути до мінімальної кількості плиток (мір). Розрахунок кількості плиток слід починати з підбору найменших за розміром. Притирання промитих бензином або уайт-спіритом плиток виробляють в зворотному порядку: беруть спочатку плитку найбільшого розміру, потім наступну по довжині і, нарешті, найменшу міру.

По кінцях зібраного блоку притирають захисні бічні міри, враховуючи їх розмір в блоці. Для формування блоків і надійної фіксації використовуються набори приладдя.

На міри розміром більше 100 мм наносяться дві насічки розташовані від вимірювальних граней на відстані з коефіцієнтом 0,211 від номінального розміру (для параллелепіпедной форми) і вказують на місця опори. Базування розраховане для мінімізації можливого прогину при установці в горизонтальному положенні.

При складанні набору плиток (блоку) завжди прагнуть отримати його з найменшої кількості плиток, тому що зі збільшенням кількості плиток в блоці зростає похибка.

Для отримання блоку з найменшої кількості плиток потрібно керуватися таким правилом: спочатку брати плитку, відповідну останнім знаком даного розміру, потім передостаннім і т. д.

Коли дрібна частина числа готова, треба відняти від цілої частини розміру суму цілих міліметрів, підібраних під час складання дробової частини, і взяти відповідну плитку в цілих мм.

Приклад: необхідно зібрати блок 71,875 мм.

Порядок складання блоку:

- 1-я плитка – 1,005 мм;
- 2-я плитка – 1,37 мм;
- 3-тя плитка – 9,5 мм;
- 4-я плитка – 60 мм.

Разом: 71,875 мм.

Для точних вимірювань, особливо в разі тривалого користування блоком одного розміру, доцільно проводити атестацію розміру блоку в зібраному вигляді. При експлуатації слід враховувати, що міцність з'єднання заходів в блоці падає зі зменшенням температури, а також з плином часу.

Для розширення експлуатаційних можливостей КМД передбачені набори приладдя до них (ГОСТ 4119-76 [18]). У комплекти приладдя входять

державки (струбцини) і боковики різних розмірів і форми. Це дозволяє здійснювати за допомогою КМД вимірювання як зовнішніх, так і внутрішніх розмірів, калібрування координатно-вимірювальних машин (рис. 1.9), висотомірів і т.п., а також проведення розмітки. Слід пам'ятати, що при стягуванні заходів в струбцинах або стяжками виникають деформації і можливий деякий перекис боковиків. Наприклад, деформація блоку заходів довжиною 100 мм при мінімальному нормируемому зусиллі стиснення (350 Н) дорівнює 0,7 мкм.

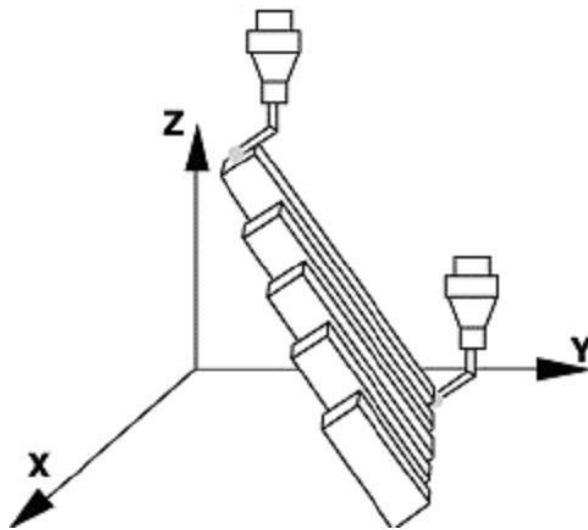


Рисунок 1.9 – Набор з п'яти мір КМД для калібрування КВМ

1.3 Притирання

Притиранням під час використанні КМД називають ефект прилипання двох плиток з плоскими відполірованими гранями.

Притирання видаляє все повітря між гранями і плитки стискаються атмосферним тиском. Поверхневий натяг залишків промивної рідини і міжмолекулярної взаємодії матеріалу плиток збільшує силу стиснення. На рисунку 1.10 наведено 36 плиток КМД, які тримаються разом після притирання. Притирання пояснюється молекулярною тяжінням в присутності найтонших шарів мастила. Плівка або краплі мастила, товщина якої приблизно дорівнює 0,02 мкм, залишається в мікропорах кінцевих мір при

зазвичай застосовуваних методах їх притирання і впливають на поверхню в результаті розрідження, що виникає в процесі притирання.

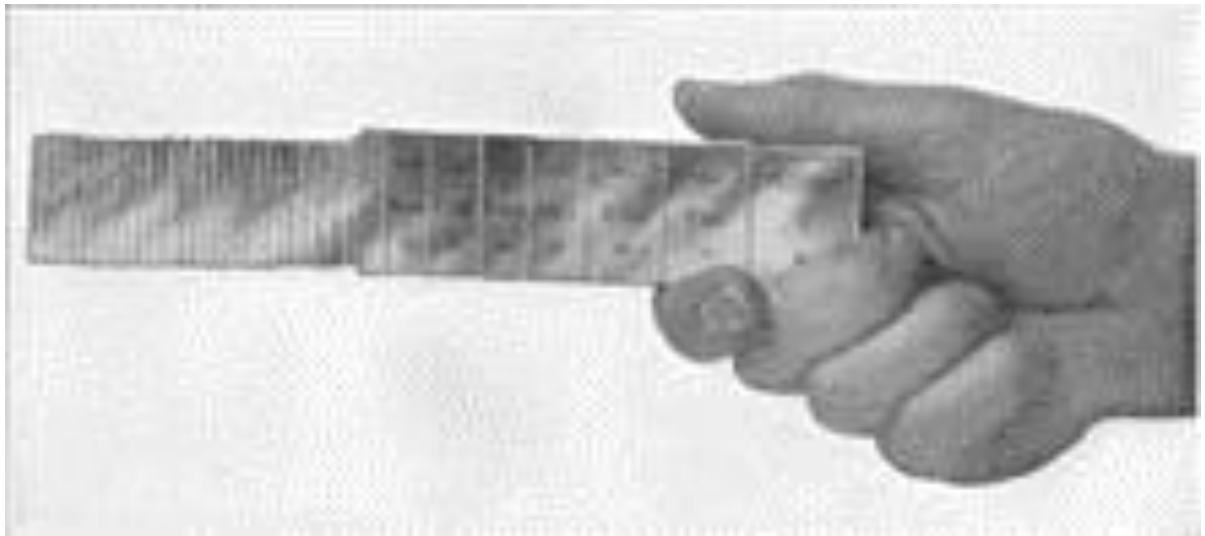


Рисунок 1.10 – 36 плиток КМД, які тримаються разом після притирання

Здатність плиток КМД до притирання є обов'язковою вимогою. Втрата притирання означає неприпустиме зношення поверхонь. Для зменшення зношення плиток при притиранні необхідно виконувати так, щоб пил і частки не потрапили між плитками. Для цього грані плиток поєднують на мінімальній площі, а потім зрушенням досягають повного прилягання площин. При зсуві межі плиток працюють скребками, очищаючи притираються поверхні.

При промиванні робочих поверхонь мір спиртом їх притирання може погіршитися. Краще промивати заходи в спеціальному очищувачі, що не містить кислоти. Повне видалення мастила веде до значного (в десятки разів) зменшення сили зчеплення кінцевих мір. Як захисний мастила також краще застосовувати масло, яке не містить кислоти. Після того як міри притерлися один до одного, сила, яку необхідно прикласти для їх зсуву перевищує 30 Н.

Для забезпечення притирання вимірювальні поверхні КМД повинні бути ретельно оброблені і мати високу площинність – при притирання до скляній пластині повинні бути відсутніми інтерференційні смуги. Це означає,

що площинність робочої поверхні заходи менше 0,1 мкм. Шорсткість робочої поверхні заходів не повинна перевищувати $Ra \leq 0,063$ мкм.

При складанні блоку мір слід враховувати, що адгезійна взаємодія між мірами при притирання призводить до деформації мір, деякої зміни їх площинності і розміру. При цьому деформація мір збільшується зі збільшенням довжини мір, а притирання до однієї міри двох мір (з двох сторін) викликає подвійну деформацію цієї. При притиранні мір довжиною до 3 мм через наявність у них відхилень від площинності у вільному стані можуть виникати додаткові похибки блоку мір.

1.4 Метрологічні вимоги КМД

Набори кінцевих мір (або окремі кінцеві міри), що застосовуються для передачі розміру одиниці довжини іншим кінцевими мірами та для перевірки і градування вимірювальних приладів, повинні бути повірені в якості зразкових 1, 2, 3, 4 або 5-го розрядів згідно МИ 1604-87 ГСИ [2].

Довірча похибка вимірювань довжини при довірчій ймовірності 0,99 не повинна перевищувати для розряду, мкм:

- 1-го $\pm (0,02 + 0,2 L)$;
- 2-го $\pm (0,05 + 0,5 L)$;
- 3-го $\pm (0,1 + 1 L)$;
- 4-го $\pm (0,2 + 2 L)$;
- 5-го $\pm (0,5 + 5 L)$,

де L – довжина кінцевої міри, м.

Для кінцевих мір, що знаходяться в експлуатації (в тому числі випускаються після ремонту), встановлюють додаткові класи точності 4 і 5.

Відхилення довжини кінцевих мір від номінальної при температурі 20 °С і відхилення від плоскопаралельності для кінцевих мір класів точності 4 і 5 не повинні перевищувати значень, зазначених в табл. 1.5

Притирання кінцевої міри класів точності 4 і 5 повинні відповідати

таким вимогам: вони повинні притиратися до плоскої скляної пластини всієї вимірювальною поверхнею без інтерференційних смуг, допускаються відтінки у вигляді жовтих плям, які спостерігаються в білому світі. Для кінцевих мір класу точності 5 допускаються відтінки будь-якого кольору по краях вимірювальних поверхонь на відстані до 1,5 мм від бакових граней.

Зразкові кінцеві міри різних розрядів повинні відповідати за притиранням, відхилення довжини від номінального значення і відхилення від плоскопаралельності класами точності, не нижче зазначених у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Притирання

Розряд зразкової КМД	Клас точності за		
	Притиранням	відхиленням довжини від номінального значення	відхиленням від плоскопаралельності
1	0	2	0
2	0	2	0
3	1	3	1
4	1	4	2
5	4	5	4

Границі довірчої похибки вимірювань довжини зразкових кінцевих мір 1 – 5-го розрядів, і допустимі відхилення від плоскопаралельності для цих кінцевих мір наведені в табл. 1.8, яка наведена в Додатку А.

Для віднесення кінцевих мір до класів точності їх довжини повинні бути виміряні з похибкою не більше встановленої для розрядів зразкових кінцевих мір, зазначених в табл. 1.6.

Зміна довжини кінцевих мір внаслідок нестабільності матеріалу протягом року не повинна перевищувати для розряду, мкм:

- 1-го $\pm 0,02 + 0,2 L$;
- 2-го $\pm 0,05 + 0,5 L$;
- 3-го $\pm 0,05 + 1 L$.

Таблиця 1.5 – Допустимі відхилення

Номинальний і значення довжини КМД, мм	Допустимі відхилення, мкм, для класів точності			
	4		5	
	довжина КМД від номінального значення, ±	від плоскопаралельності	довжина КМД від номінального значення, ±	від плоскопаралельності
До 10	2,0	0,6	4	0,6
Св 10 до 25	2,5	0,6	5	0,6
» 25 » 50	3,0	0,6	6	0,6
50 » 50 » 75	4,0	0,8	8	0,8
» 75 » 100	5,0	0,8	10	0,8
» 100 » 150	6,0	0,8	10	0,8
» 150 » 200	8,0	0,8	15	0,8
250	10	0,8	20	0,8
300	12	0,8	25	0,8
400	14	1,0	30	1,0
500	16	1,0	30	1,0
600	20	1,5	35	1,5
700	22	1,5	35	1,5
800	26	1,5	35	1,5
900	28	1,5	35	1,5
1000	30	1,5	40	1,5

Таблиця 1.6 – Похибка, встановлена для розрядів КМД

Клас точності	Повірка з похибкою, встановленою для розрядів кінцевих мір з номінальною довжиною	
	До 100 мм	Вище 100 до 1000 мм
00	1	1
01	2	2
0	2	3
I	3	4
2	4	4
3	4	4
4	5	5
5	5	5

1.5 Повірка та калібрування кінцевих мір довжини

В ієрархічному ланцюгу передачі розмірів від еталону довжини (метр) КМД грають важливу роль як стабільний матеріальний носій постійного розміру. Перенесення одиниці довжини, що базується на специфічній довжині хвилі світла, на еталонні КМД проводиться за допомогою фундаментальних інтерференційних вимірювань [19].

Хоча КМД застосовують для вимірювань і для налаштування приладів при відносних вимірах, але їх головне призначення – передача розмірів від еталону довжини і забезпечення єдності вимірювань. Для цієї мети були розроблені повірочні схеми і випущені міри різноманітної точності по класах і розрядах, кожен з яких перевіряють певними приладами.

Але найважливішою якістю КМД на відміну від більшості сучасних електронних та оптичних засобів вимірювань, є те, що вони є матеріальним носієм розміру. На цій посаді поки КМД нічим замінити не можна.

Першим інструментом, застосованим в 19-му столітті для калібрування КМД був спеціальний мікрометр підвищеної точності.

Надалі точність повірочних приладів підвищувалася і в даний час досягла дуже високих (можливо гранично досяжних) значень. Причому точні прилади, що дозволяють повіряти і калібрувати КМД, перестали бути спеціальними і є в багатьох лабораторіях. Більш того, всі КМД можуть повірятися за допомогою, наприклад, індуктивних і інкрементних фотоелектричних компараторів, що є у продажу, і методи вимірювання на цих приладах добре відпрацьовані. Ця обставина також вкорочує і спрощує повірочну схему КМД. Хоча слід мати на увазі, що це досить дорогі пристрої і робота на них вимагає високої кваліфікації. Недолік всіх повірочних високоточних вимірювальних засобів полягає в тому, що похибки вимірювання заходів малі (наприклад, менше 0,05 мкм) і результати вимірювань важко перевірити на інших приладах.

1.5.1 Метод безпосереднього вимірювання найбільш зручний спосіб механізації тваринницьких ферм КМД, враховуючи ту обставину, що в даний час з'явилися високоточні вимірювальні засоби з великими діапазонами вимірювань і з цифровим відліком.

Для безпосереднього вимірювання КМД в даний час застосовують безконтактні лазерні інтерферометри і інкрементні фотоелектричні компаратори.

Інтерференційні прилади є найбільш природними і точними засобами вимірювань, так як засновані на передачі розміру одиниці довжини через довжину світлової хвилі.

1.5.2 Абсолютний інтерференційний метод дозволяє за допомогою спеціальних безконтактних лазерних інтерферометрів проводити вимірювання мір безпосередньо в довжинах хвиль. Сучасні лазерні інтерферометри обладнані пристроєм для компенсації помилок від впливу навколишнього середовища: змін температури, зміни тиску повітря і вологості. Однак більш надійним при точних вимірах є дотримання нормальних умов застосування в приміщенні, в якому проводяться вимірювання (термоконстантне приміщення).

При абсолютному інтерференційному вимірюванні довжина вимірюваної міри визначається безпосередньо по числу півхвиль однорідного (монохроматичного) світла, відповідного даному розміру. Труднощами таких вимірів було підрахунок великого числа інтерференційних смуг. Смуги відраховують від бази, в якості якої служить поверхню скляної пластини, до якої притерта міра, яка вимірюється, до вільної поверхні міри, що повіряється.

Однак в сучасних лазерних інтерферометрах підрахунок смуг автоматизований і здійснюється комп'ютером або мікропроцесором, забезпечених реверсивним лічильником смуг.

Абсолютний інтерференційний метод заснований на порівнянні довжини вимірюваної міри з довжиною хвилі світла. Перевага еталона –

довжини хвилі світла – полягає в тому, що він легко відтворюється і не змінюється з часом.

Абсолютний інтерференційний метод застосовують, головним чином, для повірки КМД класу К в сертифікованих метрологічних центрах.

При таких точних вимірах не тільки дотримуюся нормальні умови навколишнього середовища, але також вимірюють температуру повітря, міри, що калібрується і вимірювального пристосування (стійки) з точністю (0,1-0,2) °С за допомогою платинових термометрів опору, а також вологість і тиск повітря і вносять компенсаційні поправки в результат вимірювання. Однак в системі компенсації закладена певна невизначеність. Формули, за якими розраховуються компенсаційні поправки, не завжди відповідають фізичної сутності виникаючих помилок. Деякі формули є емпіричними. Таким образ, немає впевненості, що поправки обчислені правильно.

Розмір КМД при нормальних умовах визначається відстанню між двома поверхнями, з яких одна є вільною вимірювальною поверхнею міри, а друга плоскою поверхнею допоміжної пластини (наприклад, скляна пластина), до якої міра притерта іншою своєю вимірювальною поверхнею. Слід зазначити, що такий метод вносить деяку похибку, тому що поверхню скляної пластини, до якої притерта міра і власне притерта поверхня міри не ідентичні. Але, мабуть, ця похибка не велика.

Нормальними умовами повірки є: температура +20 °С, тиск 101325 н.е./м², відсутність зовнішніх сил, що змінюють довжину міри (крім сили тяжіння і сили зчеплення між мірою і допоміжною пластиною). КМД до 100 мм перевіряють у вертикальному положенні, КМД довжиною понад 100 мм перевіряють в горизонтальному положенні при установці міри вузькою неробочою поверхнею на дві опори, розташовані на відстані 0,21ℓ (ℓ – довжина міри) від її кінців (точки Ейрі).

Точність вимірювання довжини мір до 100 мм за допомогою безконтактного лазерного інтерферометра з компенсацією помилок від змін зовнішніх умов становить: $U = \pm (0,015 + 0,5 \cdot \ell)$ мкм, де ℓ в м.

1.5.3 Виробники КМД і в сучасній заводській практиці зазвичай не використовують безконтактний лазерний інтерферометр, а повірку і калібрування КМД виробляють переважно з допомогою інкрементних фотоелектричних приладів з цифровим відліком (компараторів) шляхом порівняння повіряється міра з зразковою КМД з мірою вищого класу К.

Для безпосереднього вимірювання КМД (рис. 1.11) застосовують спеціальні компаратори, забезпечені інкрементними оптоелектронними вимірювальними головками і мікропроцесорним блоком або комп'ютером з цифровим відліком. Компаратори вимірюють міри у всьому діапазоні вимірювання головки, наприклад, 25 мм шляхом порівняння їх розміру з однієї зразковою КМД (еталоном). Це зручно і вигідно мати один еталон при перевірці цілого набору КМД. Такі компаратори випускає, наприклад, фірма Tesa (Швейцарія).

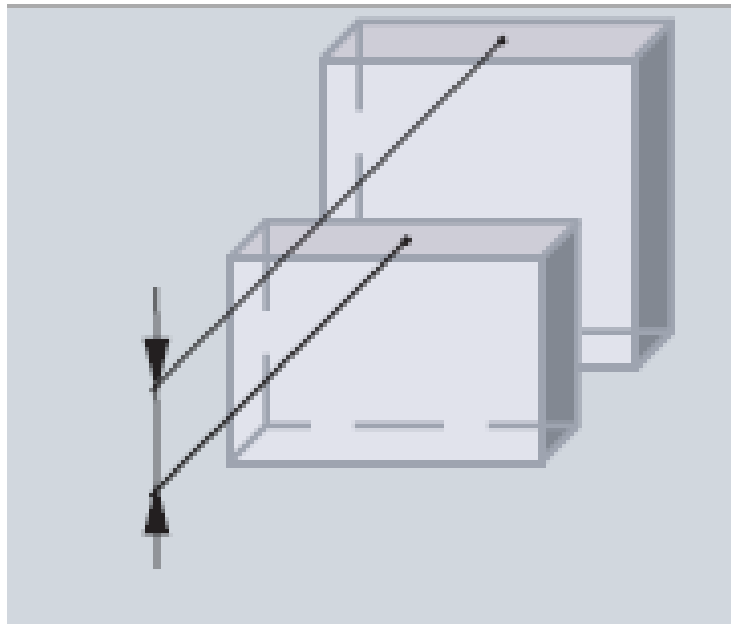


Рисунок 1.11 – Безпосереднє вимірювання КМД на високочастотному компараторі

Подібні компаратори засновані на диференційному методі вимірювання. Еталон і міра, що калібрується по черзі вимірюються з двох

сторін двома перетворювачами. Міра, що калібрується і еталон встановлені поруч на столику стійки і по черзі переміщаються в вимірювальну позицію під щупи перетворювачів. Один перетворювач встановлений під столиком і контактує з нижньою поверхнею міри або еталона, другий встановлений в стійці і контактує з верхньою поверхнею міри або еталона. Нижній перетворювач має діапазон вимірювань 1,0 мм, верхній – 25 мм. Дискретність – 0,01 або 0,005 мкм.

Столик з мірою, що калібрується і еталон переміщаються під щупами за програмою або вручну. Вимірювальні щупи перетворювачів аретира електродвигуном або вакуумом. Вимірювальне зусилля нижнього щупа 0,63 Н, верхнього – 1,0 Н створюється за допомогою електродвигуна.

Компаратор забезпечений пристроєм для вимірювання температури повітря і матеріалу, що складається з декількох високоточних платинових датчиків температури. Один закріплюється на міру, що повіряється інший на стійці і т.д. Результати вимірювання температури надходять в електронний блок і вносяться поправки в результати вимірювання довжини в залежності від відхилень температури повітря і КМД від нормальної. Точність вимірювання температури становить (0,1-0,2) °С.

Результати вимірювання і компенсаційні поправки обробляються в мікропроцесорному блоці і висвічуються на цифровому дисплеї з дискретністю 0,01 мкм.

Міру, що повіряється вимірюють в п'яти точках: в середині і по кутах, відступаючи на 2 мм від краю. Серединну довжину міри, що повіряється визначають як алгебраїчну суму серединної довжини зразкової міри (зазначеної у свідоцтві) і різниці показань приладу при вимірюванні цих мір в середніх точках. Відхилення від плоскопаралельності кінцевої міри, що повіряється приймають рівним найбільшому за абсолютним значенням відхилення довжини заходи в одному з кутів щодо її серединної довжини .

Точність вимірювання довжини мір до 100 мм на компараторі з двома інкрементними оптоелектронними лінійними енкодерами з компенсацією

помилку від змін температури становить:

- повторюваність – 0,015 мкм;
- похибка вимірювання $U = \pm (0,015 + 0,5 \cdot \ell)$ мкм, де ℓ в м.

1.6 Операції та умови повірки/калібрування КМД

Під час проведення повірки повинні бути виконані операції, зазначені в табл. 1.10, яка наведена в Додатку А.

Під час проведення повірки повинні бути дотримані наступні умови. Номінальні значення нормальних величин, що впливають під час повірки:

- температура 20 °С;
- атмосферний тиск 101325 Па (760 мм.рт.ст.);
- тиск водяної пари в повітрі 1333 Па (10 мм.рт.ст.) – тільки для зразкових кінцевих мір довжини 1-го розряду.

Положення кінцевих мір довжиною до 100 мм – вертикальне і горизонтальне; довжиною понад 100 мм – горизонтальне. Кінцева міра повинна бути встановлена вузької бічною поверхнею на двох опорах, розташованих на відстані $0,211 L$ від кінців міри (L – довжина кінцевої міри, м).

Додаткові зусилля, що впливають на довжину і плоскопараллельним кінцевим заходи, повинні бути виключені.

Методи і засоби повірки КМД наведені в табл. 1.9, яка наведена в Додатку А.

Під час абсолютного інтерференційного результату вимірювань довжини кінцевої міри завжди призводять до нормальної температури (20 °С).

Під час вимірювання методом порівняння сталевих кінцевих мір з твердосплавними в отриманий результат повинні бути внесені поправки на вплив величин, що впливають.

Вплив складових, викликаних відхиленням встановлених значень

атмосферного тиску і тиску водяної пари від номінальних, враховують тільки при вимірах кінцевих мір абсолютним інтерференційним методом.

Розрахунки поправок кожної впливає величини наведені в НТД на методики повірки зразкових і робочих кінцевих мір, відповідних розрядів і класів точності.

1.7 Методи та засоби повірки/калібрування КМД

1.7.1 Вимірювання довжини і відхилень від плоскопаралельності зразкових кінцевих мір довжини 1-го розряду повинні проводитися абсолютним інтерференційним методом; зразкових кінцевих мір довжини 2, 3, 4 і 5-го розрядів – методами порівняння з зразковими кінцевими заходами вищого розряду.

Допускається вимірювати зразкові кінцеві міри 2-го розряду абсолютним інтерференційним методом.

1.7.2 Вимірювання довжини і відхилень від плоскопаралельності зразкових кінцевих мір з твердого сплаву рекомендується робити по зразковим кінцевими мірами з твердого сплаву методом порівняння.

1.7.3 Під час проведення операцій повірки 2, 3, 4, 5 і 6 табл. 1.10 для зразкових кінцевих мір 1 і 2-го розрядів слід застосовувати нижні плоскі скляні пластини класу точності 1 згідно ГОСТ 8.215-76 [4]. Крім того, при проведенні операцій 4 і 5 для зразкових кінцевих мір 1-го розряду рекомендується застосовувати пластини, виготовлені з того ж матеріалу і з тим же якістю поверхні, що і кінцеві міри. Якщо кінцеві міри притиралися до скляній пластині, то в результаті вимірів вводять поправку на різномірність матеріалів вимірювальних поверхонь.

Під час проведення операцій 2 і 5 табл. 1.10 для зразкових кінцевих мір 3, 4 і 5-го розрядів, допускається застосування нижніх плоских скляних пластин класу точності 2 згідно ГОСТ 8.215-76 [4].

Під час перевірки притирання кінцевих мір один до одного зусилля зсуву визначають за допомогою динамометра згідно ГОСТ 13837-79 [5].

1.7.4 Відхилення від площинності вимірювальних поверхонь кінцевих мір в непритертих стані визначають для кінцевих мір довжиною від 0,6 до 3,0 мм безконтактним інтерференційним методом або контактним методом на вимірювальних приладах з малим вимірювальним зусиллям до 150 сН (наприклад, мікатори, індуктивних датчиках), або за допомогою плоских скляних пластин.

1.7.5 Вибір методу і засобів для визначення серединної довжини відхилення від номінальної довжини і відхилення від плоскопаралельності кінцевих мір повинен проводитися відповідно до вказівок табл. 1.5.

1.7.6 Твердість вимірювальних поверхонь кінцевих мір визначають за допомогою твердомірів для металів за ГОСТ 23677-79 [6].

1.7.7 Шорсткість вимірювальних поверхонь визначають за допомогою Мікроінтерферометр типу МІІ-4 та інших приладів для вимірювання шорсткості поверхонь ГОСТ 19300-73 [7], шорсткість неробочих поверхонь кінцевих мір визначають за допомогою зразків порівняння шорсткості поверхонь ГОСТ 9378-75 [8] або зразків з параметром шорсткості $R_a = 0,63$ мкм

1.7.8 Ступінь пористості і максимальний розмір пор на вимірювальних поверхнях кінцевих мір з твердого сплаву визначають на який атестований як засіб вимірювання мікроскопі МІМ 7 або універсальних вимірювальних мікроскопах за методикою, встановленою згідно ГОСТ 9391-80 [9].

1.7.9 Температурний коефіцієнт лінійного розширення кінцевих мір або спеціальних зразків, виготовлених з того ж матеріалу, визначають на дилатометрах типу Шовенара, ДКВ-1, ДКВ-4, ДКВ-5а в інтервалі температур 10 – 30 °С.

1.7.10 Розміри поперечного перерізу і відхилення від плоскопаралельності неробочих поверхонь кінцевих мір визначають за допомогою мікрометрів типу МК згідно ГОСТ 6507-78 або мікрометрів важільних типу МР згідно ГОСТ 4381-80 [10] з діапазоном вимірювань 0 – 25 і 25 – 50 мм.

1.7.11 Відхилення від перпендикулярності неробочих поверхонь щодо вимірювальних поверхонь кінцевих мір і неробочих поверхонь між собою визначають за допомогою автоколімаційних приладів або універсальних вимірювальних засобів (кутомірів, індикаторних головок і ін.).

1.7.12 Висновок про зміну довжини кінцевих мір внаслідок нестабільності матеріалу виробляють за результатами періодичних перевірок довжини протягом двох і більше років.

1.8 Оформлення результатів

1.8.1 На набори плоскопаралельних кінцевих мір довжини (або окремі кінцеві міри), визнані придатними видають свідоцтва встановленої форми.

1.8.2 У свідоцтві перевірки/калібрування зразкових кінцевих мір довжини повинні зазначатися такі дані:

- найменування підприємства-виробника;
- номер набору;
- найменування підприємства, який представив набір кінцевих мір для перевірки/калібрування;
- розряд;
- номінальна довжина і результати вимірювань: серединна довжина в міліметрах або відхилення серединної довжини від номінального значення в мкм;
- дата складання свідоцтва.

1.8.3 Результати вимірювань, наведені у свідоцтві, слід округлити згідно з вказівками табл. 1.11.

1.8.4 Результати первинної перевірки підприємство-виробник оформлює відміткою в випускному атестаті (паспорті).

1.8.5 Клас точності набору кінцевих мір, що знаходяться в експлуатації, визначають нижчим класом окремої кінцевої міри, що входить в набір.

1.8.6 Набори кінцевих мір з градацією 0,001 мм відносити до класів точності 3, 4 і 5 забороняється.

1.8.7 Плоскопаралельні кінцеві міри довжини, що не відповідають вище наведеним вимогам до випуску в обіг і застосування не допускають, і на них видають повідомлення про непридатність.

Таблиця 1.11 – Округлення результатів вимірювання

Розряд зразкових КМД	Округлення результатів вимірювання для номінальних КМД, мкм		
	До 250 мм	Вищ. 250 до 400 мм	Вищ. 400 до 1000 мм
1	0,01	0,01	0,01
2	0,01	0,01	0,1
3	0,01	0,1	0,1
4 и 5	0,1	0,1	0,1

2 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ОЦІНОК ВХІДНИХ ВЕЛИЧИН

2.1 Загальні положення

Поняття “невизначеність” міцно увійшло в життя сучасних метрологів як продукт неминучого процесу міжнародної стандартизації оцінювання якості вимірювань. Цьому сприяло запровадження стандарту ISO 17025 (ДСТУ ISO 17025:2006) [11], визначаючого міжнародне визнання результатів випробування та калібрування лабораторій, які пройшли акредитацію. Даний стандарт законодавчо закріпив необхідність наявності процедур оцінки невизначеності вимірювань, які проводяться в акредитованих лабораторіях.

Невизначеність вимірювань – це характеристика недостовірності вимірювань, прийнята на міжнародному рівні. Поняття «невизначеність» походить від англійського слова «Uncertainty». Невизначеність відображає відсутність точного знання (істинного) значення вимірюваної величини Y і висловлює сумнів в тому, наскільки точно результат вимірювання у представляє Y .

Невизначеність – це параметр, пов’язаний з результатом вимірювань, і який характеризує розкид значень, які можна обґрунтовано приписати вимірюваній величині Y . Перша літера слова «uncertainty» U стала позначенням цього параметра. Наведене визначення найкраще ілюструється стандартною формою запису результату вимірювання:

$$Y = y \pm U, p = 0,95$$

Із заданого запису видно, що вірогідний розкид значень Y знаходиться в діапазоні $\pm U$ відносно виміряного значення y , а ступінь обґрунтованості

знаходження значень Y в цьому інтервалі визначається з вірогідністю. Графічне доповнення к визначенню поняття «невизначеність вимірювання»

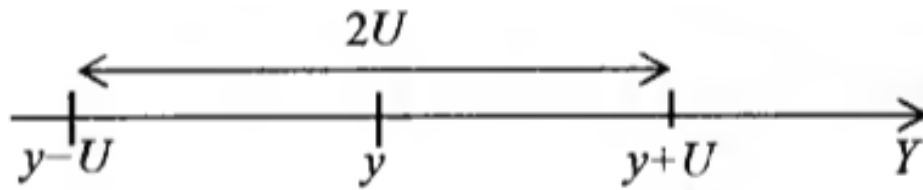


Рисунок 2.1 – Графічне доповнення к визначенню поняття «невизначеність вимірювання»

Результат вимірювання (після внесення поправки) може бути максимально близьким до значення вимірюваної величини (і тому мати дуже малу похибку), навіть якщо він має велику невизначеність. Таким чином, невизначеність результату вимірювання не можна плутати з невідомою похибкою, що залишилась.

Оскільки точні значення складової похибки результату вимірювання невідомі і непізнавані, то невизначеності, пов'язані з випадковими і систематичними ефектами, що призводять до похибки, можуть бути оцінені. Але, навіть якщо оцінені невизначеності незначні, немає ніякої гарантії, що похибка результату вимірювання буде незначною, тому що при визначенні поправки або в оцінюванні неповноти знання якийсь систематичний ефект може не враховуватися, оскільки він не був розпізнаний. Таким чином, невизначеність результату вимірювання необов'язково є вказанням на правдоподібність того, що результат вимірювання близький до значення вимірюваної величини; це просто оцінювання близькості результату вимірювання до найкращого значення, що відповідає наявним на цей час знанням.

Невизначеність (непевність) вимірювання виражає той факт, що для даної вимірюваної величини і для даного результату її вимірювання немає єдиного значення, а є нескінченне число значень, розсіяних навколо резуль-

тату, який узгоджується з усіма спостереженнями та даними, а також зі знанням фізичного світу, який з різним ступенем упевненості може бути приписаний вимірюваній величині [12]. На рисунку 2.2 наведено ілюстрацію значення невизначеності вимірювання. Основна увага сконцентрована на невизначеності, а не на похибці.

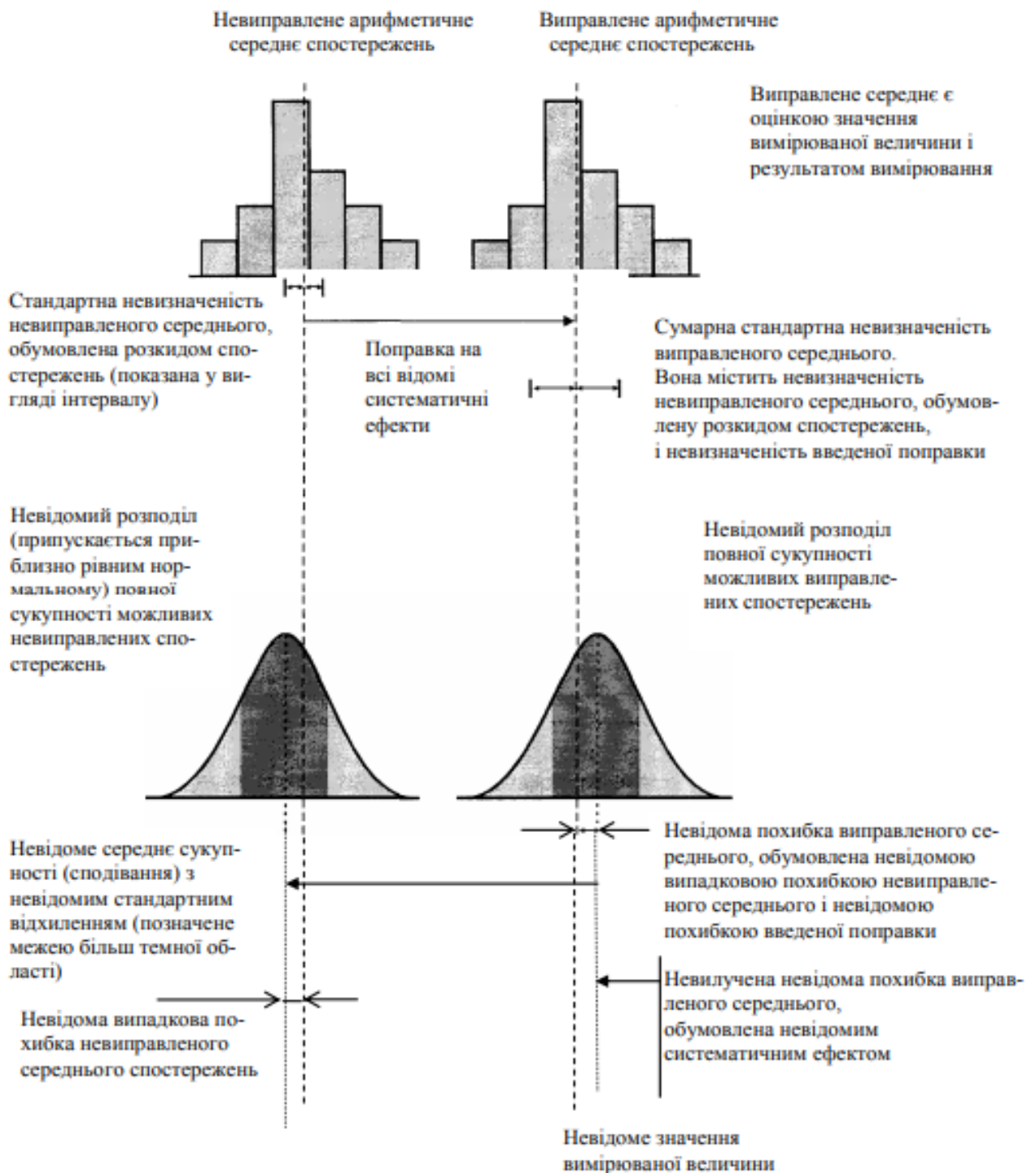


Рисунок 2.2 – Графічна ілюстрація значення невизначеності вимірювання

Можна припустити, що результат вимірювання є надійною оцінкою вимірюваної величини і що його комбінована невизначеність є надійною мірою її можливої похибки.

На практиці існує багато можливих джерел невизначеностей (непевностей) при вимірюваннях, зокрема такі:

- а) неповне визначення вимірюваної величини;
- б) неточна реалізація визначення вимірюваної величини;
- в) вибірка, що не відображається, – отримане значення може не відображати вимірювану величину;
- г) неточні відомості про вплив навколишнього середовища на вимірювання або недосконале вимірювання умов навколишнього середовища;
- д) суб'єктивна систематична похибка оператора при знятті показань з аналогових приладів;
- е) кінцева роздільна здатність приладу або поріг чутливості;
- ж) неточні значення, приписані еталонам, що використовуються при вимірюванні, стандартним зразкам речовин і матеріалів;
- и) неточні значення констант і інших параметрів, які були отримані із зовнішніх джерел та використовуються в алгоритмі опрацювання даних;
- к) апроксимації та припущення, що використовуються у методі вимірювання і вимірювальній процедурі;
- л) зміни в повторних спостереженнях вимірюваної величини при явно однакових умовах.

Ці джерела необов'язково є незалежними, і деякі з джерел від (а) до (к) можуть вносити вклад у джерело (л). Звичайно, невідомий систематичний ефект не може бути внесений в оцінку невизначеності результату вимірювання, але він вносить вклад у його похибку.

2.2 Класифікація невизначеності вимірювань

За способом оцінювання:

- стандартна невизначеність, u – невизначеність результату вимірювання, оцінена за середньоквадратичним відхиленням
- стандартна невизначеність типу A, u_A – невизначеність, яка зумовлена дисперсією результатів вимірювання і може бути оцінена статистичними методами;
- стандартна невизначеність типу B, u_B – невизначеність спричинена різноманітними впливовими факторами і може бути оцінена ймовірнісними методами;
- сумарна невизначеність – ймовірнісна сума стандартних невизначеностей;
- розширена невизначеність – інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, які з достатнім обґрунтуванням можуть бути приписані вимірюваній величині.

За джерелом виникнення невизначеність буває:

- методична;
- інструментальна;
- суб'єктивна.

Причини і джерела вище наведених невизначеностей зведено до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Причини і джерела невизначеностей

Невизначеність	Причини і джерела невизначеностей
Методична	– неточності визначення умов випробувального середовища; – неточності відтворення умов випробовування;

Продовження таблиці 2.1

Невизначеність	Причини і джерела невизначеностей
	<ul style="list-style-type: none"> – недосконале врахування впливу зовнішніх факторів, неадекватне їх оцінювання; – недосконале визначення об'єкту випробовування (вимірювання), його властивостей, неповна ідентифікація вимірювальної величини; – недосконала реалізація методики випробовування; – будь-які припущення, нехтування, апроксимація; – похибки характеристик ЗВТ; – взаємодія ЗВТ із об'єктом випробовування (вимірювання); – неточності перевідних коефіцієнтів, констант тощо; – неточні значення величин, приписані робочим еталонам, стандартним зразкам; – невідповідність фізичного об'єкта його математичній моделі (порогова невідповідність); – не виключені систематичні похибки; – похибки введених поправок.
Інструментальна	<ul style="list-style-type: none"> – основна похибка ЗВТ (похибка за нормальних умов експлуатації); – додаткова похибка ЗВТ (внаслідок впливу зовнішніх факторів за межами нормальних областей значень); – похибка, спричинена варіацією показів ЗВТ; – похибка ЗВТ внаслідок тимчасової нестабільності.
Суб'єктивна	<ul style="list-style-type: none"> – вплив оператора на ЗВТ та об'єкт випробовування (вимірювання); – похибка зчитування даних зі шкали аналогового ЗВТ; – похибка заокруглення отриманих значень величин;

Продовження таблиці 2.1

Невизначеність	Причини і джерела невизначеностей
	<ul style="list-style-type: none"> – неточності реалізації процедур випробовування (вимірювання); – порушення інструкції з експлуатації ЗВТ; – помилки під час обробки діаграм, таблиць, побудови графіків; – помилки під час пересилання (перенесення) даних.

Оцінюють невизначеність як методів випробовування (вимірювання), так і конкретних результатів вимірювання.

Оцінка невизначеності, яка характеризує точність методу випробовування (вимірювання) називається апіорною, її визначають:

- під час розроблення методики випробовування (вимірювання) з метою регламентування приписаної невизначеності в усіх, передбачених методикою, умовах випробовування;

- за відсутності методики або приписаного значення невизначеності – перед випробовуванням (вимірюванням), для оцінки найбільшої можливої Невизначеності.

На підставі усієї наявної інформації про причини і джерела невизначеності обчислюють окремі невизначеності за типом В, сумарну стандартну невизначеність та розширену невизначеність. Підґрунтям апіорного оцінювання невизначеності є теорія ймовірності, яка дозволяє досліджувати і описувати закони розподілу випадкових величин.

Оцінка невизначеності для конкретних результатів вимірювання є апостеріорною, її визначають безпосередньо після випробовування (вимірювання), за конкретних умов, за визначеною методикою із застосуванням конкретних ЗВТ.

Невизначеність вимірювання, пов'язана з оцінками вхідних величин, визначається за методом оцінювання типу А або типу Б.

Метод А для оцінювання стандартної невизначеності – це метод, під час якого невизначеність вимірювання оцінюється за допомогою статистичного аналізу ряду спостережень. У цьому випадку стандартна невизначеність вимірювання є експериментальним стандартним відхиленням середнього значення, яке отримується за допомогою методів усереднення або відповідного регресійного аналізу.

Метод В для оцінювання стандартної невизначеності – це метод, під час якого невизначеність вимірювання оцінюється іншими способами, ніж статистичний аналіз ряду спостережень. У цьому випадку оцінка стандартної невизначеності ґрунтується на інших наукових знаннях.

Примітка: іноді при калібруванні зустрічаються випадки, коли всі можливі значення величин лежать тільки на одній стороні граничних значень. Відомим випадком є так звана помилка косинуса. Розгляд цього особливого випадку дається в посиланні [3].

2.3 Метод А для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання

2.3.1 Метод типу А для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання застосовується, коли для однієї з вхідних величин при однакових умовах вимірювання проведені кілька незалежних спостережень. Якщо процес вимірювання має достатній дозвіл, то отримані значення будуть показувати спостережуваний розкид.

2.3.2 Припустимо, що повторно виміряна вхідна величина X_i є величиною Q та було проведено n -а кількість статистично незалежних спостережень ($n > 1$), тоді оцінка величини Q – це \bar{q} , середнє арифметичне значення або середнє значення окремих спостережуваних значень q_j ($j=1,2,\dots,n$) визначаємо за формулою

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (2.1)$$

Стандартна невизначеність, пов'язана з оцінкою \bar{q} , оцінюється відповідно до одного з наступних методів:

– оцінка дисперсії розподілу ймовірностей, що лежить в основі, є експериментальною дисперсією $S^2(q)$ значень, яку визначаємо за формулою

$$S^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - q)^2 \quad (2.2)$$

Позитивний квадратний корінь з цієї дисперсії називається експериментальним стандартним відхиленням. Найкращою оцінкою дисперсії середнього арифметичного значення \bar{q} є експериментальна дисперсія середнього значення, яка визначається за формулою

$$S^2(\bar{q}) = \frac{S^2(q)}{n} \quad (2.3)$$

Позитивний квадратний корінь з дисперсії середнього значення називається експериментальним стандартним відхиленням середнього значення. Стандартна невизначеність вимірювання $u(q)$, пов'язана з вхідною оцінкою q є експериментальним стандартним відхиленням середнього значення, визначаємо за формулою

$$u(\bar{q}) = S(\bar{q}) \quad (2.4)$$

Попередження: Якщо число n повторних спостережень менше ($n < 10$), то надійність значення стандартної невизначеності вимірювання, яка оцінена за методом А, – як зазначено за формулою (2.4), – повинна прийматися до уваги. Якщо число спостережень n не може збільшуватися, то повинні

прийматися в розрахунок інші описані в подальшому тексті методи оцінки стандартної невизначеності вимірювання;

– якщо для вимірювання, проведеного по певному методу вимірювання, який перебуває під статистичним контролем, є комбінована або сумісна оцінка дисперсії окремого виміру, то вона за відомих умов буде краще описувати дисперсію розподілу ймовірностей, що лежить в основі спостережень, ніж експериментальна дисперсія окремого вимірювання, оцінена в одиничному випадку з малого обмеженого числа спостережень. Якщо значення вхідної величини Q в цьому випадку оцінюється як середнє значення q малого числа n статистично незалежних повторних спостережень, то дисперсія середнього значення оцінюється за формулою

$$S^2(\bar{q}) = \frac{S^2(q)}{n} \quad (2.5)$$

Стандартну невизначеність вимірювання, слід оцінювати за формулою (2.4).

2.4 Метод Б для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання

2.4.1 Під час оцінювання стандартної невизначеності вимірювання за типом В невизначеність вимірювання, пов'язана оцінкою x_i вхідної величини x_i оцінюється за методом, який полягає не в статистичному аналізі ряду спостережень. Стандартна невизначеність вимірювання $u(x_i)$ виходить при цьому за допомогою метрологічно обґрунтованої оцінки мінливості вхідної величини x_i , враховуючи всю наявну в розпорядженні інформацію. До цієї категорії належать наступні значення:

- значення з інших, раніше проведених вимірювань;
- значення, отримані в результаті досвіду або загально знань про поведінку і властивостях застосовуваного Матеріалів або приладів;
- дані виробника;

- значення, що містяться в свідченнях про калібрування або інших посвідченнях;
- невизначеності вимірювання, пов'язані з довідковими значеннями з довідкової літератури.

2.4.2 Осмислене застосування наявної в розпорядженні інформації для оцінювання стану невизначеності вимірювання за методом Б можливо тільки, якщо є достатній досвід і загальні знання. Вони є навичками, якими оволодівають в метрологічній практиці. Добре обгрунтована оцінка стандартної невизначеності за типом Б буде такою ж надійною, як і оцінка за типом А, особливо в ситуації, в якій оцінювання за типом А ґрунтується тільки на відносно невеликому числі статистично незалежних спостережень.

Необхідно розрізняти такі випадки:

- якщо відомо тільки одиночне значення для величини X_i , наприклад, одне вимірне значення, отримане з раніше проведеного вимірювання, довідкове значення з літератури чи поправка, то таке значення використовується в якості оцінки x_i . Якщо навіть дається стандартна невизначеність вимірювання $u(x_i)$, пов'язана зі значенням x_i , то її необхідно використовувати. В інших випадках стандартну невизначеність вимірювання слід розраховувати з однозначних даних про невизначеність вимірювання. Якщо кількість спостережень не може бути збільшена, інший підхід, наданий у наступному пункті має бути розглянутим;

- якщо для величини X_i з теоретичних чи експериментальних основ може передбачатися розподіл ймовірностей, то математичне очікування і квадратний корінь з дисперсії цього розподілу використовуються як оцінка x_i і пов'язана з ним стандартна невизначеність вимірювання $u(x_i)$;

- якщо можуть бути оцінені для значення величини X_i тільки верхня і нижня межа a_+ і a_- (наприклад, дані виробника про вимірювальному приладі, область мінливості температури, похибка округлення або відкидання внаслідок автоматичної обробки даних), то необхідно приймати

розподіл вірогідності з постійною щільністю ймовірності між кордонами (прямокутна щільність імовірності) для мінливості вхідної величини X_i .

Відповідно до умов попереднього випадку, описаним вище, отримуємо

$$X_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (2.6)$$

для оцінки вхідної величини i

$$u^2(X_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2 \quad (2.7)$$

для квадрата стандартної невизначеності вимірювання. Якщо різниця між граничними значеннями описується за допомогою $2a$, то рівність (2.7) може також бути записано у формі

$$u^2(X_i) = \frac{1}{3}a^2 \quad (2.8)$$

Прямокутна щільність ймовірностей є відповідним теоретико імовірнісним описом стану знання, коли нічого більш невідомо крім границь мінливості значення вхідної величини X_i . Якщо можна прийняти, що значення згаданої величини більш вірогідні біля центру області мінливості, ніж біля кордонів, то трикутне або нормальний розподіл представлятиме кращу модель. З іншого боку U – образне розподіл може бути доцільним, коли значення біля меж є більш ймовірними, ніж значення біля центру.

2.5 Процедура оцінки невизначеності вимірювання, пов'язаної з оцінкою вихідної величини

Для некоррельованих вхідних величин квадрат стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаний з оцінкою у вихідної величини визначається

за формулою

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2 \quad (2.9)$$

Примітка: у вимірювальній техніці є випадки, при калібрування зустрічаються рідко, в яких функція моделі сильно нелінійна або деякі коефіцієнти чутливості [див. Рівність (2.10) і (2.11)] приймають нульове значення або зникають. Тоді необхідно додавати в рівність (2.9) член більш високого порядку. Опис цього особливого випадку дається в [3].

$u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) є внеском у стандартну невизначеність вимірювання, який пов'язаний з оцінкою у вихідної величини, який виходить при даній оцінці x_i вхідної величини X_i зі стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаної з оцінкою, за наступною формулою

$$u_i(y) = c_i u(X_i), \quad (2.10)$$

де c_i – коефіцієнт чутливості, що належить до вхідної величини x_i , який розраховується як приватна похідна функції моделі f по X_i за формулою

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial X_i} \quad (2.11)$$

Коефіцієнт чутливості c_i описує, якою мірою оцінка у вихідної величини знаходиться під впливом зміни оцінок вхідних величин x_i . Він може оцінюватися з функції моделі f за допомогою формули (2.10) або за допомогою чисельних методів, тобто так, що розраховуються зміни оцінки у для змін оцінок x_i на $+u(x_i)$ і $-u(x_i)$, і отримана різниця в y , розділена на $2u(x_i)$, приймається в якості значення коефіцієнта чутливості c_i . В багатьох випадках зміна оцінок у вихідної величини цілеспрямовано визначати експериментальним способом, при якому повторюють вимір, наприклад, при $x_i \pm u(x_i)$.

В той час як $u(x_i)$ завжди постійна, вклад невизначеності $u_i(y)$ відповідно до рівності (2.10) залежно від знака коефіцієнта чутливості p_i може приймати позитивні або негативні значення. У разі корельованих вхідних величин знак $u_i(y)$ повинен обов'язково прийматися до уваги.

Якщо функція моделі f є сумою або різницею вхідних величин X_i ,

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i \quad (2.12)$$

то також оцінка вихідної величини відповідно до рівності (2.2) дає в результаті відповідну суму або різницю оцінок вхідних величин

$$y = \sum_{i=1}^N p_i X_i \quad (2.13)$$

Коефіцієнти чутливості, рівні p_i , і формула (2.17) призводять до

$$u_i(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(X_i) \quad (2.14)$$

Якщо функція моделі f є твором або приватним вхідних величин X_i ,

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (2.15)$$

то оцінка вихідної величини в свою чергу є відповідним твором або приватним оцінок вхідних величин

$$y = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (2.16)$$

У цьому випадку коефіцієнти чутливості рівні $p_i u / x_i$, і з формули (2.9)

виходить рівність аналогічна формулі (2.14), якщо при цьому використовуються відносні стандартні невизначеності вимірювання $w(y)=u(y)/|y|$ і $w(x_i)=u(x_i)/|x_i|$

$$W^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(X_i) \quad (2.17)$$

Якщо дві вхідні величини X_i і X_k є корельованими певною мірою, тобто вони є залежними один від одного тим чи іншим способом, то серед вкладів невизначеності повинна враховуватися також їх коваріація. Наскільки ефект кореляції повинен братися до уваги, залежить від відповідного вимірювання, від знань про метод вимірювання та від оцінки взаємних залежностей вхідних величин. Загалом, необхідно звернути увагу на те, що нехтування кореляціями між вхідними величинами може призвести до помилкової оцінки стандартної невизначеності вимірюваної величини.

Коваріація, пов'язана з оцінками двох вхідних величин X_i і X_k може встановлюватися рівною нулю або розглядатися як пренебрежимо мала, якщо:

- обидві вхідні величини X_i і X_k є незалежними один від одного, наприклад, якщо вони спостерігалися багаторазово, але не одночасно, в різних, незалежних один від одного експериментах або якщо вони представляють (описують) результуючу величину різних, незалежних один від одного проведених досліджень;
- одна з вхідних величин X_i і X_k може розглядатися як константа;
- немає ніяких причин для кореляції між вхідними величинами X_i і X_k .

Іноді кореляції можуть виключатися з допомогою відповідного вибору функції моделі.

Аналіз невизначеності вимірювання, часто також званий бюджетом

невизначеності вимірювання, повинен містити список усіх джерел невизначеності під час вимірювання разом з належними їм стандартними невизначеностями вимірювання і дані про те, як вони були отримані. При багаторазових повторних спостереженнях повинно також вказуватися число n проведених спостережень.

Для наочності важливі для аналізу данні також рекомендується вказувати в табличній формі. У таблиці повинні призначатися всім величинам формульні позначення X_i або короткі позначки для ідентифікації. Крім цього для кожної величини таблиця повинна містити, принаймні, оцінку x_i , пов'язану з нею стандартну невизначеність $u(x_i)$, коефіцієнт чутливості c_i і внесок невизначеності $u_i(y)$. Для занесених в таблицю числових значень повинні вказуватися одиниці виміру для відповідної величини.

Формальний приклад, який наведено для такого табличного розташування і є дійсним для некоррельованих вхідних величин, представлений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Схема розташування величин, оцінок, стандартних невизначеностей виміру, коефіцієнтів чутливості і вкладів невизначеності, які використовуються для аналізу невизначеності

Величина X_i	Оцінка x_i	Стандартна невизначеність вимірювання $u(x_i)$	Ймовірно сті	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності $u_i(y)$
X_1	X_1	$U(X_1)$		C_1	$U_1(y)$
X_2	X_2	$U(X_2)$		C_2	$U_2(y)$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots	\vdots
X_n	X_n	$U(X_n)$		C_n	$U_n(y)$
Y	y				$u(y)$

Стандартна невизначеність вимірювання $u(y)$, пов'язана з результатом вимірювання, дана внизу в правій колонці таблиці, є коренем із суми квадратів всіх вкладів невизначеностей в правій крайній колонці таблиці.

Сірі, розташовані внизу, осередки в таблиці залишаються незаповненими.

У ЕА прийнято, що калібрувальні лабораторії, акредитовані членом ЕА, у свідоцтвах калібрування вказують розширену невизначеність U , яка виходить множенням стандартної невизначеності вимірювання $u(y)$, пов'язаної з оцінкою y вихідної величини, на коефіцієнт охоплення k

$$U = ku(y) \quad (2.19)$$

У випадках, при яких вимірюваній величині може приписуватися нормальний розподіл ймовірностей (розподіл Гауса) і при яких стандартна невизначеність вимірювання, пов'язана з оцінкою вихідної величини досить надійна, коефіцієнт охоплення стандартно приймається рівним 2 ($k = 2$). Приписана розширена невизначеність вимірювання відповідає ймовірності покриття приблизно 95%. Ці умови, загалом, справедливі для калібрувань

Ухвалення нормального розподілу може не в кожному випадку розглядатися як підходяще. Однак у випадках, коли кілька вкладів невизначеності ($N \geq 3$), що отримані з розподілів ймовірностей незалежних величин, наприклад, нормальні або прямокутні розподілу, дають зіставні вклади в стандартну невизначеність вимірювання, пов'язану з оцінкою вихідної величини, виконуються умови центральної граничної теореми, так що в дуже хорошому наближенні може прийматися, що для вихідної величини справедливо нормально розподіл.

Надійність стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаної з оцінкою вихідної величини, може оцінюватися за допомогою ефективних ступенів свободи. Критерій надійності загалом повністю виконується, якщо вклад невизначеності, оцінений за методом A , що не визначався з меншого числа, ніж 10 повторних спостережень.

Якщо одне з названих умов (нормальний розподіл або достатня надійність) не виконано, то для стандартного коефіцієнта охоплення $k = 2$ виходить розширення невизначеності вимірювання, яка відповідає

ймовірності покриття менший ніж 95%. У цих випадках повинні застосовуватися інші методи, щоб встановити, що значення розширеної невизначеності вимірювання відповідає приблизно такій же ймовірності покриття як в нормальному випадку. Застосування приблизно однакових значень ймовірності покриття суттєво, якщо результати вимірювання однієї і тієї ж величини повинні порівнюватися один з одним, наприклад, при оцінці результатів кругових звірень або при оцінці виконання вимог специфікації.

В інших випадках, тобто у всіх випадках, в яких прийняття нормального розподілення надійно не обґрунтоване, необхідно добувати інформацію про дійсний розподіл вірогідності значень вихідної величини, і з нього визначати значення коефіцієнта охоплення, який відповідає ймовірності покриття 95%.

3 АНАЛІЗ ДАНИХ, ОТРИМАННИХ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ КМД З НОМІНАЛЬНОЮ ДОВЖИНОЮ 50 ММ

Калібрування КМД 0-го класу точності (ISO 3650:1998 [1]) з номінальною довжиною 50 мм виконується методом порівняння, використовуючи компаратор довжини, що наведений на рисунку 3.1 і в якості еталонної міри відкалібровану КМД такої ж номінальної довжини і виготовлену з такого ж матеріалу, як та, що калібрується.

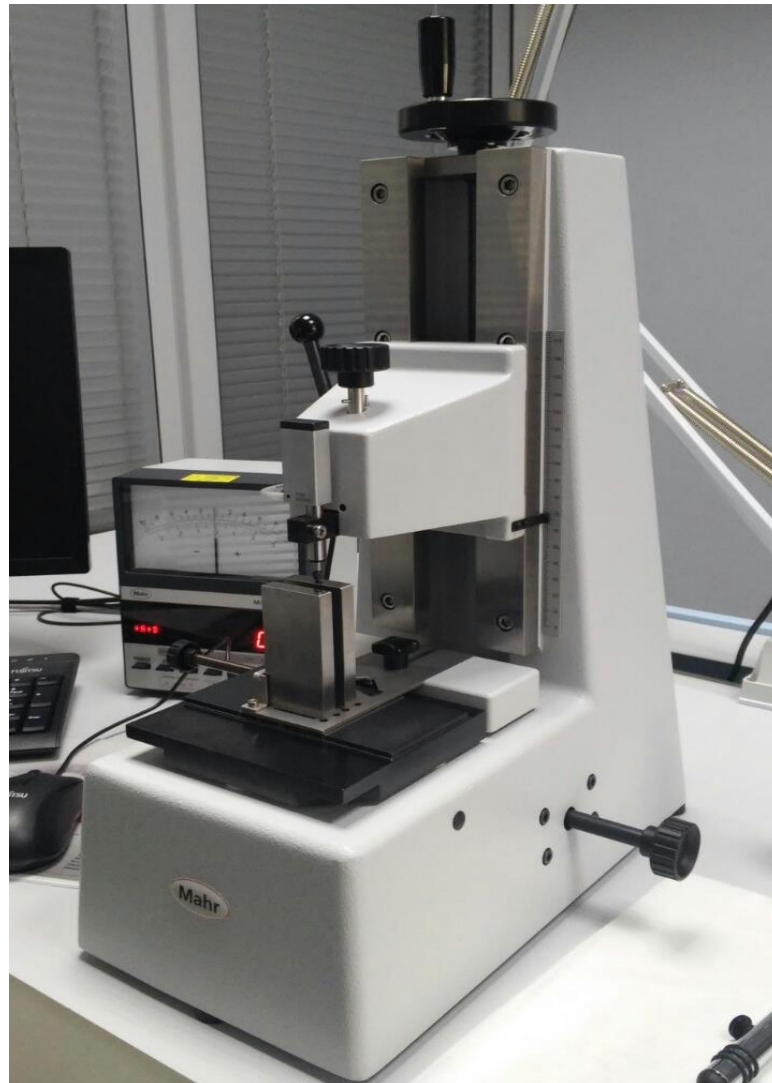


Рисунок 3.1 – Інтерферометр Precimar 826 PC

Різниця в серединних довжинах визначається у вертикальному положенні двох КМД використовуючи два наконечника, що торкаються верхньої та нижньої вимірювальних поверхонь (двоконтактний вимірювальний прилад). Дійсна довжина l_x КМД, що калібрується, пов'язана з дійсною довжиною l_s еталонною КМД формулою

$$l_x = l_s + \delta \quad (3.1)$$

де δ – виміряна різниця довжин;

l_x і l_s – довжини КМД в реальних умовах вимірювання, особливо при температурі, яка через невизначеність вимірювання температури в лабораторії може не збігатися з встановленою (нормальною) температурою для вимірювання довжини.

Довжина КМД l_x , що калібрується, при нормальній температурі виходить із співвідношення

$$l_x = l_s + \delta_D + \delta + \delta_C - L(\bar{\alpha} \times \delta t + \delta \alpha \times \Delta t) - \delta_V, \quad (3.2)$$

де l_s – довжина еталонної КМД при встановленій температурі 20 °С відповідно до її свідоцтва про калібрування;

δ_D – зміна довжини еталонної КМД з часу її останнього калібрування внаслідок дрейфу;

δ – спостережувана різниця в довжинах між еталонною КМД та тією, що калібрується;

δ_C – поправка на нелінійність і зсув компаратора довжини;

L – номінальна довжина КМД;

$\bar{\alpha} = (\alpha_x + \alpha_s) / 2$ – середнє значення коефіцієнту температурного розширення еталонної КМД та тієї, що калібрується;

$\delta t = (t_x - t_s)$ – різниця в температурах між еталонною КМД та тією, що калібрується;

$\delta\alpha = (\alpha_x - \alpha_s)$ – різниця між температурними коефіцієнтами розширення еталонної КМД та тією, що калібрується;

$\Delta\bar{t} = (t_x + t_s)/2 - t_0$ – відхилення середньої температури еталонної КМД та тієї, що калібрується, від встановленої (нормальної);

δl_v – поправка через контакт не в центрі вимірювальних поверхонь КМД, що калібрується.

Еталонна КМД (l_s): довжина еталонної КМД та пов'язаної з нею розширеною невизначеністю вимірювання вказується у свідоцтві калібрування на комплект КМД як 50,00002 мм \pm 30 нм (коефіцієнт охоплення $k = 2$).

Дрейф розміру еталонної КМД (δl_D) зміна в часі довжини еталонної КМД оцінюється з попередніх калібрувань значенням "нуль" з максимальними від нього відхиленнями \pm 30 нм.

Загальний досвід з КМД цього типу вказує на те, що значення дрейфу яке дорівнює нулю, є найбільш вірогідним і можна прийняти припущення про трикутний розподіл можливих відхилень.

Компаратор (δl_c): перевіряється перед калібруванням, щоб компаратор довжини відповідав вимогам встановленим в керівництві EAL – G21 з калібрування КМД. Звідси може бути встановлено, що для значень різниці довжин D до \pm 10 мкм поправка до показуваної різниці довжин знаходиться в межах \pm (30 нм + $0,02 \times |D|$). Враховуючи допуск на КМД, що калібрується 0-го класу точності і допуск на еталонну КМД класу точності К максимальна різниця довжин буде перебувати в межах \pm 1 мкм, таким чином межі для поправки на нелінійність і зсув компаратора складуть \pm 32 нм.

Температурні поправки ($\Delta\bar{t}, \delta\alpha, \delta l_v, \bar{\alpha}$): перед калібруванням необхідно потурбуватися, щоб КМД прийняла температуру навколишнього середовища. Різниця що залишилася в температурах між еталонною КМД та тією, що калібрується, оцінюється максимум в межах \pm 0,05 К. На підставі свідоцтва калібрування еталонної КМД і даних виробника для КМД, що калібрується,

коефіцієнт лінійного температурного розширення сталевих КМД приймається в межах $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Для різниці в лінійних коефіцієнтах температурного розширення при об'єднанні двох прямокутних розподілів виходить трикутний розподіл з межами $\pm 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Відхилення середньої температури вимірювань від встановленої (нормальної) $t_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ оцінюється максимально як $\pm 5,0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Оскільки оцінки різниці лінійних температурних коефіцієнтів розширення і відхилення середньої температури від установленної (нормальної) дорівнюють нулю, то при оцінюванні відповідних внесків у невизначеність необхідно враховувати члени другого порядку. Тому стандартна невизначеність добутку $(\Delta\bar{l} \times \delta\alpha)$ у вираз (3.2) виходить як добуток стандартних невизначеностей, які відносяться до цих множників. Остаточо це призводить до стандартної невизначеності $u(\Delta\bar{l} \times \delta\alpha) = 0,236 \times 10^{-6}$.

Контакт не в центрі (δ_v): для КМД 0-го класу точності різниця довжин, визначена з вимірів в центрі і чотирьох кутах, повинна бути в межах $\pm 12,0$ мкм (ISO 3650:1998 [1]). Припускаючи, що така зміна виникає на вимірювальних поверхнях уздовж короткого ребра довжиною 9 мм і що серединна довжина вимірюється всередині кола з радіусом 0,5 мм, поправка через контакт не в центрі оцінюється максимально як $\pm 7,6$ нм.

Кореляція: входні величини розглядаються як некорельовані.

Спостереження для визначення різниці між еталонною КМД та КМД, що калібрується, було проведено п'ять спостережень, причому перед кожним зняттям відліку компаратор знову налаштовувався за еталонною КМД щоб виключити зсув. Спостережувані значення зведені до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Спостережувані значення

№	1	2	3	4	5
Спостережуване значення, нм	100	90	80	90	100

Середнє арифметичне значення: $\bar{\delta} = -94$ нм.

Сумарна оцінка стандартного відхилення: $S_p(\delta) = 12$ нм.

Стандартна невизначеність: $u(\delta) = S(\bar{\delta}) = \frac{12}{\sqrt{5}} = 5,37$ нм.

Бюджет невизначеності (δ_{X_i}) зведений до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Бюджет невизначеності (δ_{X_i})

Величин а X_i	Оцінка x_i	Стандартна невизначеність $u(X_i)$	Розподіл	Коеф. чутливість і c_i	Внесок у невизначеність $u_i(y)$
l_s	50,000020 мм	15 нм	норм.	1,0	15,0 нм
δ_D	0 мм	17,3 нм	трикут.	1,0	17,3 нм
δ	-0,000094 мм	5,37 нм	норм.	1,0	5,37 нм
δ_c	0 мм	18,5 нм	прямок.	1,0	18,5 нм
δt	0°C	0,0289°C	прямок.	- 575 нм	-16,6 нм
$(\Delta \bar{t} \times \delta \alpha)$	0	0,236·10	спец.	50 мм	-11,8 нм
δ_V	0 мм	3,87 нм	прямок.	-1,0	-3,87 нм
	49,999926 мм				36,4 нм

Розширена невизначеність розраховуємо за формулою (3.10)

$$U = ku(l_x) = 2 \times 36,4 = 72,8 \text{ нм} \cong 73 \text{ нм}$$

Повний результат вимірювань: Вимірне значення КМД з номінальною довжиною 50 мм становить 49,999926 мм \pm 73 нм.

Зазначена розширена невизначеність отримана множенням стандартної невизначеності вимірювань на коефіцієнт охоплення $k = 2$. Вона відповідає для нормального розподілу відхиленню від середнього з імовірністю охоплення приблизно 95%.

ВИСНОВОК

Під час складання звіту про результат вимірювання фізичної величини необхідно подати кількісне зазначення якості результату так, щоб можна було правильно оцінити його надійність. Без такого зазначення результати вимірювань не можна порівняти ні між собою, ні з довідковими величинами, поданими у специфікації чи стандарті. Тому необхідно, щоб була легкоздійсненна, зрозуміла і загальноприйнята методика опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності у вимірюваннях.

На світовому ринку визначальним є те, щоб методика оцінювання невизначеності була однаковою у цілому світі, в результаті чого вимірювання, проведені в різних країнах, можна було легко порівняти.

Методика оцінювання невизначеності вимірювання, що розроблена в даній роботі є універсальною: придатною для геометричних вимірювань і для всіх типів вхідних даних, що використовуються у вимірюваннях, для акредитованих випробувальних та калібрувальних лабораторій згідно ISO/IEC 17025 [14].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 ISO 3650:1998 Geometrical Product Specifications (GPS) – Length standards – Gauge blocks.
- 2 МИ 1604-87 ГСИ. Меры длины концевые плоскопараллельные. Общие требования к методикам поверки .
- 3 JCGM 100:2008 GUM 1995 зі змінами, оцінювання даних вимірювання – Керівництво щодо виразу невизначеності вимірювань.
- 4 ГОСТ 8.215-76 Государственная система обеспечения единства измерений. Пластины плоские стеклянные для интерференционных измерений. Методы и средства поверки.
- 5 ГОСТ 13837-79 Динамометры общего назначения. Технические условия.
- 6 ГОСТ 23677-79. Твердомеры для металлов. Общие технические требования (с Изменениями N 1, 2).
- 7 ГОСТ 19300-86 Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры (с Изменением N 1).
- 8 ГОСТ 9378-93 (ИСО 2632-1-85, ИСО 2632-2-85) Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия.
- 9 ГОСТ 9391-80. Сплавы твердые спеченные. Методы определения пористости и микроструктуры (с Изменением N 1).
- 10 ГОСТ 4381-87 Микрометры рычажные. Общие технические условия.
- 11 ДСТУ ISO/IEC 17025:2017. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005 , IDT).
- 12 Васілевський, О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 8 – 12, с.

- 13 ГОСТ 6507-90 Микрометры. Технические условия (с Изменением N1).
- 14 ISO/IEC 17025 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- 15 ГОСТ 9038-90 Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия (с Изменением N 1)
- 16 EN ISO 3650:1998 Geometrical product specifications (GPS). Length standards. Gauge blocks
- 17 ISO 14253-1:1998 Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications.
- 18 ГОСТ 4119-76 Наборы принадлежностей к плоскопараллельным концевым мерам длины. Технические условия.
- 19 Semenets V. Technological Chain Modeling to Control the Quality of New Product Manufacturing / V. Semenets, V. Beskorovainyi, O. Shevchenko // Proceedings of the 7-th International Scientific and Technical Conference Information Systems and Technologies IST-2018, 10-15 Sept. 2018, Kobleve-Kharkiv. – 2018. – P. 69-72.
- 20 Семенец В. В. Интерактивные системы и технологии в интегрированном обучении студентов / В. В. Семенец, А. Д. Тевяшев, П. М. Подпружников, А. С. Овченко, С. Г. Позняков // Матеріали 7-ї Міжн. наук.-техн. конф. Інформаційні системи та технології (ІСТ-2018), 10-15 вересня 2018 р., Харків-Коблеве. – Х. : ХНУРЕ, 2018. – С. 253-255.
- 21 Визначення параметрів гідродинамічного випромінювача звукових коливань / [О. Г. Аврунін, В. В. Семенець, Л. Н. Михайлова та ін.]. // Радиотехника : Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб.. – 2019. – №196. – С. 167–179.
- 22 Модели и методы комбинаторной оптимизации в проектировании и управлении / [В. В. Семенец, И. В. Гребенник, С. В. Листровой та ін.]. – Киев: Наукова думка, 2019. – 176 с.

23 Семенец В. В. Методика повышения качества подготовки технических специалистов / В. В. Семенец, И. В. Свид, Л. Ф. Сайковская. // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития : материалы IX Междунар. науч.-метод. конф. (Минск, 1-2 ноября 2018 года). – Минск : БГУИР. – 2018. – С. 415–416.

24 Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник – К.: Кондор, 2008 – 760 с.

25 Сакало С.М., Семенець В.В., Азархов О.Ю. Надвисокі частоти в медицині (терапія і діагностика): Навч. посіб. – Х.: ХНУРЕ; Колегіум, 2005. – 264 с

26 Семенець В. Впровадження технологій дистанційного навчання у навчальний процес / В. Семенець, В. Каук, О. Аврунін // Вища школа. – 2009. – № 5. – С. 40–51.

27 Этингоф М.И. Роль концевых мер длины в современных технических измерениях/ М.И. Этингоф // Измерительная техника. –2012., №3. – С. 18-20.

28 Васильев А. С. Основы метрологии и технические измерения: Учеб. пособие для сред. ПТУ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Машиностроение, 1988. С. 5-6, 30-32.

29 Марков Н.Н. Кайнер Г.Б. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. – М.: Машиностроение, 1967. С. 7-10.