

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

(повна назва)

Кафедра Метрології та технічної експертизи

(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

(позначення документа)

Дослідження методики калібрування штангенциркуля

(тема)

Виконала:

студентка 2 курсу, групи МВТм-18-1
спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно -
вимірювальна техніка

(код і повна назва спеціальності)

освітня програма

«Метрологія та вимірювальна техніка

(повна назва спеціалізації)

Масалітіна В.Ю.

(прізвище, ініціали)

Керівник проф. Семенець В.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

М.П. Сергієнко

(прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Метрології та технічної експертизи

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

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

Освітня програма «Метрологія та вимірювальна техніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Масалітіній Вероніці Юріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методики калібрування штангенциркуля затверджена наказом по університету від 31 жовтня 2019 р. № 1604 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 5 грудня 2019 р.
3. Вихідні дані до роботи: тип штангенциркуля, що калібрується – ШЦ II;
точка калібровки – 150 мм;
температура калібровки – 20°C;
зозрішення штангенциркуля – 0,05 мм;
середній коефіцієнт теплового розширення штангенциркуля та кінцевої міри довжини – $11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____
 - 4.1 Аналітичний огляд штангенциркуля (визначення, класифікація, пристрій і принцип роботи, сучасний штангенциркуль).
 - 4.2 Огляд штангенциркуля, що підлягає калібровці (технічні вимоги, методика повірки (калібровки), основні поняття і методи калібрування).
 - 4.3 Етапи оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювальних приладів (основні визначення, загальні положення, методи оцінювання невизначеності, розширена невизначеність, інструкція).
 - 4.4 Оцінка невизначеності вимірювання при калібруванні штангенциркуля ШЦ – II.
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів): _____
 - 5.1 Тема роботи; 5.2 Мета роботи; 5.3; 5.4 Штангенциркуль; 5.5 Класифікація штангенциркулів; 5.6; 5.7; 5.8; 5.9; 5.10; 5.11; 5.12; 5.13;

5.14 Невизначеність; 5.15 Методи оцінювання стандартної невизначеності; 5.16; 5.17; 5.18 Бюджет невизначеності; 5.19 Повний результат вимірювання; 5.20 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 вирішення	04.11.2019 – 10.11.2019	
2	Розробка основної частини	11.11.2019 – 30.11.2019	
3	Написання пояснювальної записки	10.12.2019 – 05.12.2019	
4	Виконання графічної частини	06.12.2019 – 19.12.2019	
5	Представлення закінченої атестаційної на кафедрі	10.12.2019	

Дата видачі завдання 04 листопада 2019 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Семенець В.В. _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 72 с., 19 рис., 6 табл., 23 джерела.

Мета роботи – розробка методики калібрування штангенциркуля з процедурою невизначеності вимірювань.

У роботі розглядаються види штангенциркулів, принцип роботи штангенциркулів, порядок проведення повірки (калібровки) штангенциркуля, основні методи калібровки. Наведені основні етапи невизначеності вимірювань.

Розроблена методика калібрування штангенциркуля. Проведено розрахунок систематичної похибки та її невизначеності вимірювань під час калібрування штангенциркуля.

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

**ШТАНГЕНЦИРКУЛЬ, КАЛІБРУВАННЯ, МЕТОДИКА ПОВІРКИ
(КАЛІБРУВАННЯ), НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ, БЮДЖЕТ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.**

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит: 72 с., 19 рис., 6 табл., 23 источника.

Цель работы - разработка методики калибровки штангенциркуля с процедурой неопределенности измерений.

В работе рассматриваются виды штангенциркулей, принцип работы штангенциркулей, порядок проведения поверки (калибровки) штангенциркуля, основные методы калибровки. Приведены основные этапы неопределенности измерений.

Разработанная методика калибровки штангенциркуля. Проведен расчет систематической погрешности и ее неопределенности измерений при калибровке штангенциркуля.

Результаты работы могут быть использованы в калибровочных лабораториях, аккредитованных на выполнение требований стандарта ISO / IEC 17025: 2017.

ШТАНГЕНЦИРКУЛЬ, КАЛИБРОВКА, МЕТОДИКА ПОВЕРКИ (КАЛИБРОВКИ), НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ, БЮДЖЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 72 pages, 19 figures, 6 tables, 23 sources.

The purpose of the work is to develop a method of calibration of the caliper with the procedure of measurement uncertainty.

The work deals with types of calipers, the principle of work of calipers, the procedure of calibration (calibration) of calipers, basic methods of calibration. The main stages of measurement uncertainty are presented.

The method of calibration of a caliper is developed. The systematic error and its measurement uncertainty during calibration calibration were calculated.

The results of the work can be used in calibration laboratories accredited to meet the requirements of DSTU ISO / IEC 17025: 2017.

SURGERY, CALIBRATION, CALIBRATION METHOD
(CALIBRATION), UNCERTAINTY MEASUREMENT, UNCERTAINTY
BUDGET.

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ	11
1.1 Визначення та класифікація штангенциркулів.....	11
1.1.1 Підвиди штангенциркулів.....	14
1.1.2 Штангенциркулі спеціального призначення.....	17
1.2 Штангенциркуль. Визначення та принцип роботи.....	17
1.2.1 Пристрій та принцип роботи штангенциркуля.....	18
1.2.2 Правила користування штангенциркулем.....	19
1.2.3 Правила вимірювання штангенциркулем.....	19
1.2.4 Визначення показань штангенциркуля.....	20
1.3 Сучасний штангенциркуль.....	21
2 ОГЛЯД ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ,ЩО ПІДЛЯГАЄ КАЛІБРОВЦІ.	
ПОВІРКА ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ.КАЛІБРОВКА.....	29
2.1 Технічні вимоги до штангенциркуля ШЦ- II.....	29
2.2 Методика повірки штангенциркуля ШЦ-II.....	32
2.2.1 Операції і засоби перевірки.....	32
2.2.2 Умови перевірки і підготовка до неї.....	35
2.2.3 Проведення повірки штангенциркуля.....	36
2.3 Основні поняття калібрування.....	44
2.4 Основні методи калібрування.....	46
3 ОСНОВНІ ЕТАПИ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	

ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ.....	47
3.1 Основні положення та визначення щодо оцінки невизначеності вимірювань.....	47
3.2 Оцінювання невизначеності вимірювання оцінок вхідних величин.....	48
3.2.1 Загальні положення.....	48
3.2.2 Метод А для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання....	49
3.2.3 Метод Б для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання....	51
3.3 Оцінка стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаної з оцінкою вихідної величини.....	53
3.4 Розширена невизначеність.....	57
3.5 Інструкція для покрокового визначення невизначеності вимірювання.....	59
4 ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕННОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ ШЦ- II	61
ВИСНОВКИ.....	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	70

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ISO - Міжнародна організація по стандартизації

IEC - Міжнародна електротехнічна комісія

SI - Міжнародна система одиниць

ЗВ - засіб вимірювання

МВВ - методики виконання вимірювань

МХ - метрологічні характеристики

НД - нормативний документ

ВСТУП

Штангенциркуль (ШЦ) - найпопулярніший інструмент для вимірювання лінійних розмірів виробів, який застосовується вже понад 100 років. Традиційний штангенциркуль складається з прямокутної штанги (звідси і назва штангенциркуль і штангенінструмент) з вимірювальною губкою і нанесеною на штангу міліметровою шкалою і переміщається по штанзі повзуна (рамки) з другої вимірювальної губкою і ноніусом. В такому конструктивному виконанні ШЦ випускається і в даний час. Однак порівняно недавно був розроблений і випускається електронний ШЦ, забезпечений інкрементного ємнісним перетворювачем і цифровим відліком.

Проведення повірки (калібровки) штангенциркуля виконується відповідно до ГОСТ 8.113-85.

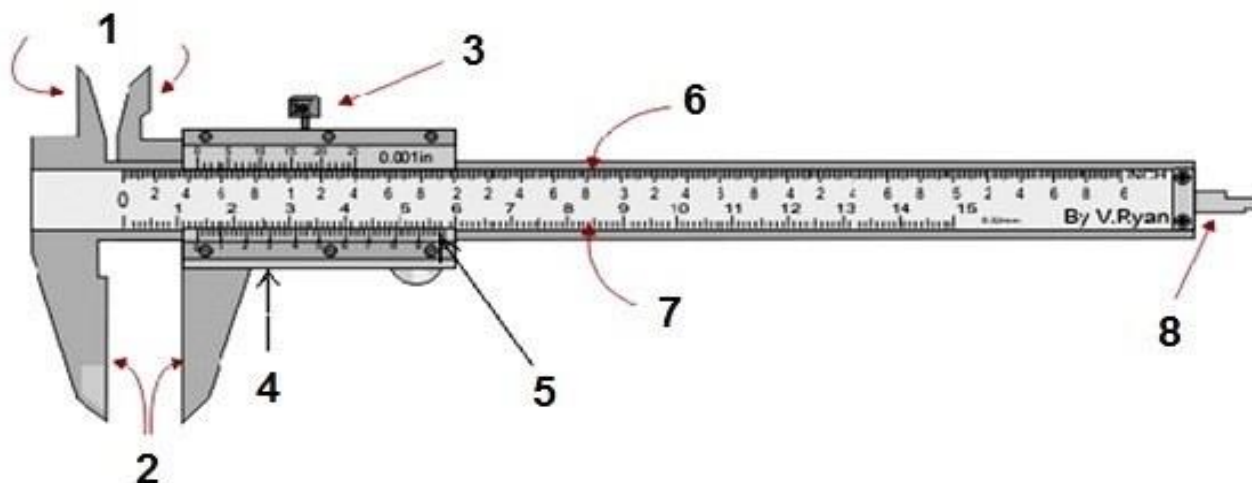
Мета даної роботи – це вдосконалення вимірювань штангенциркулем шляхом визначення невизначеності вимірювань.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ

1.1 Визначення та класифікація штангенциркулів

Штангенциркуль – це універсальний вимірювальний прилад для визначення лінійних розмірів деталей з встановленою точністю. З його допомогою можна проводити вимірювання зовнішніх і внутрішніх розмірів деталей, а також глибини отворів за умови наявності висувної штанги.

Пристрій штангенциркуля



1 - Губки для внутрішніх вимірювань

2 - Губки для зовнішніх вимірювань

3 - Затискною гвинт

4 - Рухома рамка

5 - Ноніус

6 - Штанга

7 - Шкала штанги

8 – Глибиномір

Рисунок 1.1 – Пристрій штангенциркуля

У всіх аналогічних штангенциркулем інструментів є вимірювальна штанга, завдяки якій прилад отримав таку назву. На штанзі є основна шкала, яка необхідна при вимірюванні в першу чергу.

Рухома рамка з нанесеною шкалою має можливість переміщатися по штанзі. Шкала на штанзі називається ноніусом, який має більш точну розмітку по частках поділів. Це забезпечує підвищену точність вимірювань. Ступінь точності штангенциркуля в залежності від виконання може досягати сотих часток міліметра.

Штангенциркулі мають губки двох видів:

- Для вимірювання внутрішніх розмірів.
- Для вимірювання зовнішніх розмірів.

Також є ще один вимірювальний елемент приладу, який називається глибиноміром. За допомогою нього можна виміряти глибину отворів і інші розміри.

Цифрові штангенциркулі влаштовані аналогічним чином. Однак замість ноніуса застосовується цифрова шкала, що підвищує зручність застосування і точність вимірювання приладом.



- 1 - Затискною гвинт
- 2 - Батарейка
- 3 - Ролик зміни довжини
- 4 - Обнуління
- 5 - Вмикання / Вимикання
- 6 - Перемикання мм / Дюйми

Рисунок 1.2 – Пристрій цифрового штангенциркуля

Як і всі вимірювальні прилади, цифрові прилади оснащені шкалою з ціною поділки 0,01 мм. Допустимою похибкою вважається відхилення результату вимірювання в меншу або більшу сторону на 10%. У промисловості все вимірювальні інструменти кожну півроку піддаються метрологічного контролю.

У торговельній мережі продаються штангенциркулі, упаковані в футлярі. При придбанні інструменту рекомендується оглянути вимірювальні губки. Вони повинні бути рівними, і при їх стисненні не повинно бути просвіту.

Шкала ноніуса при зімкнутих губах повинна знаходитися в нульовому положенні. Лінії позначки поділок шкали по ноніусу повинні бути нанесені чітко. У комплект приладу повинен входити паспорт з відміткою про проведену повірку на точність.

Основні види штангенциркулів:

- ноніусній;
- циферблатний;
- цифровий.

1.1.1 Підвиди штангенциркулів

Існує кілька підвидів різних штангенциркулів в залежності від розмірів, конструктивних особливостей і принципу дії:

- ШЦ-I

Це найбільш проста і популярна модель приладу, яка широко використовується в промисловому виробництві. Його називають «колумбіком» за назвою фірми виробника, яка виробляла інструмент у воєнний час (Columbus). Приладом можна виміряти внутрішні, зовнішні розміри, глибину. Інтервал вимірювань становить від 0 до 150 мм. Точність вимірювань досягає 0,02 мм.



Рисунок 1.3 – Штангенциркуль ШЦ-I

- ШЦЦ-I

Ця цифрова модель вимірювального інструмента має аналогічну конструкцію класичного штангенциркуля. Інтервал вимірювань 0-150 мм. Одним з його переваг можна назвати більш високу точність при вимірі за рахунок наявності цифрового індикатора.

Зручність використання такого цифрового приладу полягає в тому, що в будь-якій точці вимірювання можна обнулити індикатор. Також легко однією кнопкою можна перемикаєти метричну систему на дюймову.

При купівлі цифрової моделі необхідно звернути увагу на наявність нульових показань при зведених губках, а також при затягнутому стопорному гвинті цифри на дисплеї не повинні стрибати.



Рисунок 1.4 – Штангенциркуль ШЦЦ-I

- ШЦК-I

У такій конструкції штангенциркуля присутній поворотний індикатор з круглою шкалою, ціна ділення якої 0,02 мм. Такими штангенциркулями зручно користуватися при частих вимірах на виробництві. Стрілка індикатора добре видна для швидкого контролю результату, не має стрибків, на відміну від цифрових моделей. Цим приладом особливо зручно користуватися в відділі технічного контролю для замірів аналогічних типових розмірів.



Рисунок 1.5 – Штангенциркуль ШЦК-I

- ШЦ-П

Такі штангенциркулі використовуються для вимірювання внутрішніх і зовнішніх розмірів, а також для робіт по розмітці деталей перед обробкою. Тому на їх губах є насадки, виконані з твердого сплаву для захисту їх від швидкого зносу. Інтервал виміру серії приладів ШЦ-П знаходиться в межах 0-250 мм і точністю вимірювання 0,02 мм.



Рисунок 1.6 – Штангенциркуль ШЦ-П

- ШЦ-Ш і ШЦЦ-Ш

Великі деталі вимірюються найчастіше такою моделлю інструменту, так як точність вимірювань у нього вище за інші моделі і становить 0,02 мм для механічних приладів, і 0,01 мм для цифрових.



- Рисунок 1.7 – Штангенциркуль ШЦ-Ш і ШЦЦ-Ш

Найбільший розмір для вимірювання складає 500 мм. Губки в таких моделях спрямовані вниз, і можуть мати довжину до 300 мм. Це дає можливість проводити вимірювання деталей в широких межах.

1.1.2 Штангенциркулі спеціального призначення

Коротко розглянемо кілька спеціалізованих моделей штангенциркулів, призначених для спеціальних видів робіт. У торговельній мережі такі прилади з'являються досить рідко.

ШЦЦТ - застосовується для вимірів труб, його називають трубним штангенциркулем.

ШЦЦВ - для вимірювання внутрішніх розмірів, має цифровий дисплей.

ШЦЦН - аналогічна попередньому приладу, служить для вимірювання зовнішніх розмірів.

ШЦЦУ - універсальний цифровий вимірювач, в комплект входить комплект насадок для важкодоступних вимірювань: міжцентрових відстаней, стінок труб, зовнішніх і внутрішніх розмірів і т.д.

ШЦЦД - прилад для вимірювання товщини гальмівних дисків і деталей з наявністю різних виступів.

ШЦЦП - штангенциркулі застосовуються для вимірювання глибини протектора шин автомобілів.

ШЦЦМ - штангенциркулі, призначені спеціально для замірів міжцентрових відстаней [2].

1.2 Штангенцикуль. Визначення та принцип роботи

Штангенцикуль є універсальним вимірювальним інструментом. Він призначається для вимірювань високої точності. З його допомогою можна

визначити як зовнішні, так і внутрішні розміри деталі, глибину отворів та інше. Це один з найпоширеніших інструментів в технічній сфері, який є зручним у використанні. Він використовується на рівні з такими речами як мікрометр і нутромір. Завдяки своїй механічній структурі, прилад практично не має обмежень по терміну служби, так як вивести його з робочого стану можуть тільки деформації.

Вимірювання штангенциркулем застосовується як в промисловій сфері, так і в приватній, так як пристрій займає відносно мало місця. Однією з характерних ознак тут є шкала ноніуса, яка дозволяє здійснювати вимірювання до десятих часток міліметра. Особливості конструкції дозволяють фіксувати деталь, що вимірюється, причому як з внутрішньої сторони, так і з зовнішньої, щоб зменшити ймовірність виникнення похибки. Для використання тут не потрібна спеціальна підготовка і можна приступати до роботи практично відразу.

1.2.1 Пристрій та принцип роботи штангенциркуля

Назву свою інструмент отримав завдяки наявності штанги, на якій нанесена основна шкала. Ноніус відноситься до додаткової шкали, яка допомагає стежити за десятими або сотими частками міліметрів, якщо того вимагає вимір. У пристрої виробу є такі основні елементи як: штанга; рухома рамка; основна шкала, яка перебуває на штанзі; губки вимірювань внутрішньої сторони; губки вимірювання зовнішньої сторони; глибиномір; ноніус; гвинт, який затискає рамку.

У деяких моделях зустрічається подвійна шкала, яка може показувати обчислення не тільки в міліметрах, а й в дюймах. Інші деталі штангенциркуля, як правило, залишаються.

Під час пересування рухомих частин переміщається і частина з контрольним розподілом, яка і буде показувати кількість міліметрів. Незалежно від того, хочете ви виміряти зовнішні розміри, внутрішні або глибину, рухи

будуть одні і ті ж, відрізняється тільки контрольна кінцева міра. Для цього є глибиномір, який упреться в дно вимірюваного предмета. Для звичайних розмірів деталей потрібно зафіксувати у внутрішніх або зовнішніх губках. Після визначення значення по основній шкалі, можна скористатися ноніусом для більш точних свідчень.

1.2.2 Правила користування штангенциркулем

- Під час вимірювання деталі ні в якому разі не варто допускати ситуації, щоб губки штангенциркуля перекошувалися. Після того, як вони дійдуть до потрібного положення, їх потрібно зафіксувати за допомогою стопорного гвинта, щоб уникнути вищезгаданих неприємностей.

- Під час читання показань приладу, слід тримати його перед очима прямо.

- При використанні пристрою потрібно дотримуватися правил безпеки, тому що кінці губок у нього досить гострі і можуть завдати травму.

- Зберігати його слід в місцях де не потрапляють тирса, стружка, вода, пил та інші негативні фактори. При цьому не варто розташовувати його далеко від робочого місця, так як він часто використовується.

- Після роботи і перед її початком інструмент слід протирати чистою ганчіркою.

1.2.3 Правила вимірювання штангенциркулем

Перед тим, як міряти штангенциркулем, потрібно ознайомитися з основними правилами.

Вимірювання зовнішніх поверхонь. Для того, щоб отримати дані про зовнішні розміри виробу, його потрібно зафіксувати в нижніх губках інструменту. Для цього потрібно розвести його трохи більше, ніж сама

вимірювана заготовка, а потім звести губки до упору. Після цього можна знімати показання по основній та додатковій шкалі.

Вимірювання внутрішніх поверхонь. Для даної операції інструмент слід перемістити в нульове положення, після чого помістити губки для внутрішнього виміру в заготовку, паралельно вимірюваної площини. Далі слід розводити їх до упору, що допоможе зафіксувати їх в одному положенні і уникнути великих помилок. Це підходить також для визначення діаметра.

Вимірювання глибини. Тут основною частиною є глибиномір. Замір штангенциркулем здійснюється шляхом упору торця інструменту в один кінець деталі і зануренням глибиноміра в інший. Коли він упреться або дійде до потрібної точки, то можна знімати показання по основній і додатковій шкалі, так як ноніус тут як і раніше залишається актуальним.

Як виконувати розмітку. Розмітка наноситься прямими рисками від базових кромek інструменту, розташованих паралельно, або поверхні самої заготовки. Також роблять зарубки і можуть проводити окружності.

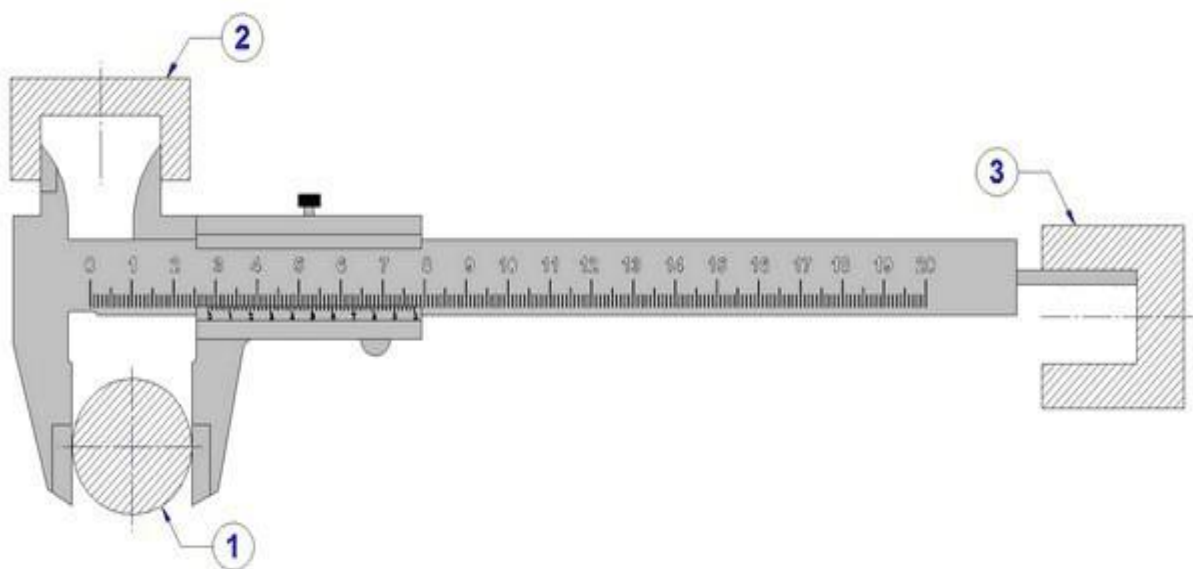


Рисунок 1.8 – Приклад вимірювання: 1)зовнішніх поверхонь; 2)внутрішніх поверхонь; 3)глибини

1.2.4 Визначення показань штангенциркуля

Основною проблемою, щоб зрозуміти як користуватися штангенциркулем, є визначення точного результату, а також використання додаткових функцій пристрою. Найбільш просто і зрозуміло справа йде з зовнішніми розмірами, але принцип зняття скрізь практично однаковий, тому, слід навчитися поводитися двома шкалами. На першій, вона ж є основною, показані цілі частки міліметра. Незалежно від того, використовуєте ви глибиномір, зовнішні або внутрішні губки, пересуваються всі три частини, відповідно відміряній відстані. Щоб не збити свідчення під час вимірювання, коли все доходить до контрольної граничної точки, відбувається фіксація прибору.

Після цього його можна зняти з заготовки і наблизити ближче до себе. Показання при цьому залишаються такими ж, як і в момент вимірювання. На штанзі поділу відразу видно і кількість цілих міліметрів видно відразу, щоб визначити більш детально, слід скористатися ноніусом. На ньому має десять поділок, кожне з яких відповідає частці цілого. Якщо перший розподіл збігається зі значенням риси на основній шкалі, то виходить рівне значення. Якщо другий розподіл збігається з будь-якої рисою, то до отриманого цілого значенню слід додати 0,1. До третього - 0,2, четвертому - 0,3 і так далі.

Існують ноніуси, які показують соті частки міліметрів. Принцип вимірювання в них дуже схожий. Головне, щоб фіксуючий елемент завжди був в робочому стані, інакше неможливо буде отримати точні дані, так як положення вимірювального приладу буде постійно збиватися [3].

1.3 Сучасний штангенциркуль

Штангенциркуль (ШЦ) - найпопулярніший інструмент для вимірювання лінійних розмірів виробів, який застосовується вже понад 100 років. Традиційний штангенциркуль складається з прямокутної штанги (звідси і

назва штангенциркуль і штангенінструмент) з вимірювальною губкою і нанесеною на штангу міліметровою шкалою і переміщається по штанзі повзуна (рамки) з другої вимірювальної губкою і ноніусом. В такому конструктивному виконанні ШЦ випускається і в даний час. Однак порівняно недавно був розроблений і випускається електронний ШЦ, забезпечений інкрементно ємнісним перетворювачем і цифровим відліком. Тому доцільно встановити, в чому переваги і недоліки обох конструкцій, що випускаються і перспективу їх застосування.

Завдяки простій конструкції, зручності в користуванні й швидкості в роботі, ШЦ є найбільш вживаним цеховим і лабораторним інструментом для лінійних вимірювань. Кожен верстатник, слюсар, технолог і конструктор має власний ШЦ. Велика розмаїтість форм вимірювальних ніжок, що дозволяють вимірювати самі різні поверхні (зовнішні, внутрішні, виступи, западини і ін.), роблять ШЦ універсальним інструментом для лінійних вимірювань. Крім ШЦ випускають багато інструментів, побудованих на цьому ж принципі - штангенглибиномір, штангенрейсмус, штангензубомір і ін.

Штангенциркулі випускають багато закордонних фірм Tesa (Швейцарія), Mitutoyo (Японія), Carl Mahr (Німеччина) і вітчизняні фірми - Челябінський інструментальний завод (ЧІЗ) і Кіровський інструментальний завод (КРИН). Також у продажу є китайські ШЦ, до яких слід ставитися з певною обережністю через не завжди високу якість.

ШЦ випускають з двостороннім або одностороннім розташуванням губок для зовнішніх і внутрішніх вимірювань і з висувним щупом для вимірювання глибин. Висувним щупом постачають тільки ШЦ з діапазоном вимірювання 125 мм.

ШЦ з відліком по штриховій шкалі має прямокутну штангу (звідси і назва інструменту - штангенциркуль) з нерухомою губкою і повзун (рамку) з губкою, який переміщається по штанзі. На штанзі нанесена основна шкала з інтервалом розподілу 1,0 мм, на повзуні завдано ноніус - допоміжна шкала, що служить для точного відліку часток поділки основної шкали. ШЦ з відліком

по штриховій шкалі випускають з діапазоном вимірювання від 125 до 2000 мм і з ціною поділки ноніуса 0,1; 0,05 і 0,02 мм.

Якість сучасних ШЦ дуже висока. Виготовлення точного направляючого повзуна (штанги) забезпечує його плавне переміщення без перекосів губок і люфтів. Застосування нержавіючих сталей і сплавів і термообробки забезпечує антикорозійні властивості інструменту і високу зносостійкість.

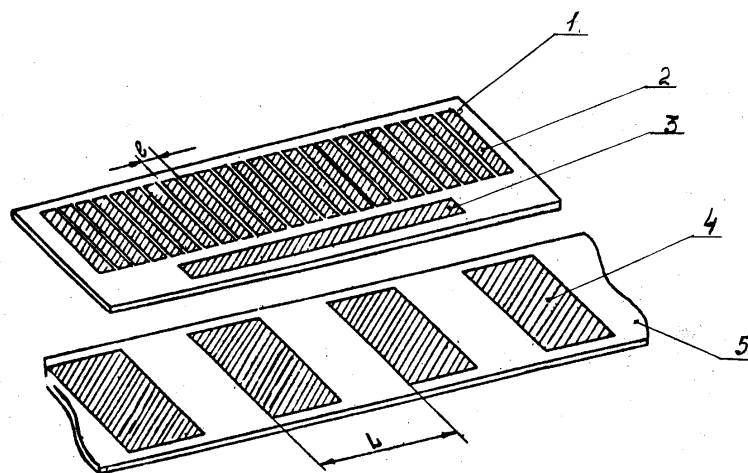
Однак механічний ШЦ зі штриховим відліком має серйозний експлуатаційний недолік - незручність відліку за штриховою шкалою і ноніусом, особливо в умовах поганого освітлення.

Цей недолік був повністю виключений, коли почали випускати електронний штангенциркуль з цифровим відліком.

Конструктивно електронний ШЦ мало відрізняється від механічного, але замість штрихових шкал і ноніуса він забезпечений інкрементним, як правило, ємнісним, перетворювачем, невеликим перетворюючим пристроєм і цифровим дисплеєм.

Інкрементний перетворювач складається з гнучкої лінійки і знімача, виконаних з фольгованого діелектричного матеріалу. Лінійка являє собою багатошарову гнучку стрічку з нанесеним на неї фольгованим шаром. На виворітній стороні завдяки клею лінійка (стрічка) закріплюються по всій довжині штанги ШЦ. На фольгованому шарі виконаний прямокутний штрих (електроди). Ширина прямокутних електродів і проміжків між ними зазвичай однакова (рис.1.9) і визначає чутливість і точність вимірювальної системи. На повзунів ШЦ розташована невелика шкала (знімач), що зчитує, з електродами, нанесеними на фольгованому шарі.

Роботу інкрементного ємнісного перетворювача можна розглянути на схемі, показаної на рис.1.9. Хоча на практиці застосовують і інші конфігурації шкал, працюючих на тому ж принципі.



- 1 – шкала з постійним кроком ℓ ;
- 2 – однакові прямокутні електроди;
- 3 – довгий електрод, прийомний;
- 4 – електроди зв'язку;
- 5 – шкала з постійним кроком L .

Рисунок 1.9 – Інкрементний ємнісний перетворювач

Перетворювач складається з двох плоских шкал. На одній шкалі 1 (лінійці) нанесені однакові прямокутні електроди 2 з постійним кроком ℓ . На ці електроди від спеціального генератора подаються періодичні напруги, що мають однакову форму і амплітуду, але зрушені по фазі. Зазначені електроди є передавальними. Розташований на тій же шкалі довгий електрод 3 є прийомним.

На другій шкалі 5 з постійним кроком L нанесені електроди зв'язку 4, деякі з яких перекривають і передають, і приймальні електроди, і здійснюють ємнісний зв'язок частини передавальних електродів з прийомним. Відношення між кроком передавальних електродів і кроком електродів зв'язку становить $L / \ell = m$, де m - ціле число і означає число передавальних електродів, розміщених на інтервалі, рівному кроці L .

Нормальна робота інкрементного ємнісного перетворювача забезпечується m -фазною системою живлення передавальних електродів для створення періодичної про-просторових хвилі. Всі напруги періодичні, мають ідентичну форму, однакову амплітуду і забезпечують заданий зсув фаз $\Delta\varphi = 2\pi / m$.

Періодичні напруги передавальних електродів створюють хвилю, що поширюється між двома пластинами. Частина цієї хвилі потрапляє на приймальний електрод і вихідний сигнал перетворювача подається на фазочутливий пристрій, який може визначити момент часу t_1 , коли фаза вихідного сигналу досягає значення φ_0 , якщо рухлива шкала зміщена відносно нерухомої на величину x_1 . При зміщенні рухомої шкали на величину x_2 та ж фаза φ_0 досягається в момент часу t_2 . Вимірюючи зсув фази вихідного сигналу можна отримати величину переміщення рухомий пластини перетворювача відносно нерухомої. Причому однозначність зв'язку фази з переміщенням до певних значень не залежить від швидкості і прискорення руху рухомої шкали відносно нерухомої.

На повзунові електронного ШЦ (рис.1.10) також розташована електронна мікропроцесорна схема і цифровий дисплей з дискретністю показань 0,01 мм. Висота цифр складає 7 - 9 мм. На корпусі повзуна є дві кнопки «вкл / викл» і установка нуля. Установка нуля можлива як при зведених губках ШЦ, так і в будь-якому місці штанги (наприклад, для контролю партії однакових деталей). Деякі моделі мають додаткові функції, наприклад, сортування за розмірами, кодовий вихід на зовнішні пристрої і ін. Вся електронна система живиться від невеликої літєвої батарейки, термін служби якої 1,5 року або 20000 годин.

Електронні ШЦ випускаються зі ступенем захисту від IP40 - до IP67 (герметичні) за стандартом DIN EN 60529 і ГОСТ 14254-96.

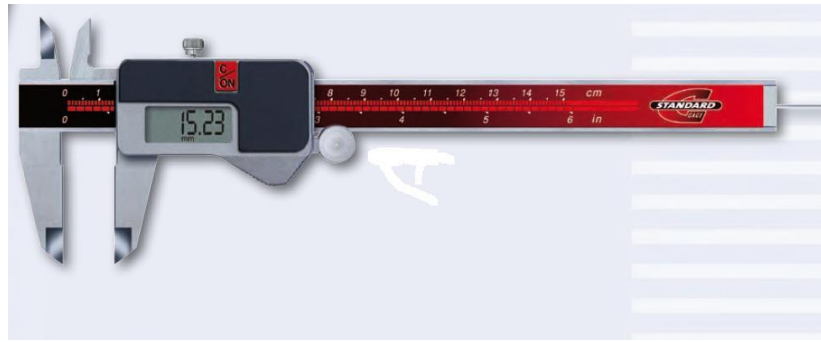


Рисунок 1.10 – Електронний штангенциркуль

Слід зазначити, що відлік показань по цифровому дисплею надзвичайно зручний, а дизайн електронного ШЦ виконаний доброзичливим і користуватися їм зручно і приємно.

Інкрементні ємнісні перетворювачі вигідно відрізняються невеликою потужністю, споживаної для зчитування інформації з шкали. Тому інкрементні ємнісні перетворювачі найбільш зручні для застосування в ручних вимірювальних приладах з батарейним харчуванням і жорсткими обмеженнями на споживану потужність (штангенглибиномір, штангенрейсмус, штангензубомір і ін.). Крім того, інкрементні ємнісні перетворювачі надзвичайно прості за конструкцією і технологічні, але практично не піддаються ремонту.

Сумарна похибка вимірювання за допомогою механічного ШЦ складається з наступних складових:

- похибка Δ_1 , що виникає від помилок нанесення штрихів шкали на штанзі і на ноніусі;
- похибка Δ_2 , що виникає через порушення принципу Аббе. Це похибка першого порядку, що залежить від довжини губок, зазорів в направляючого повзуна і зусилля притиску губки до вимірюваної деталі;
- похибка Δ_3 , що виникає через помилки відліку за штриховою шкалою і ноніусом;

- похибка $\Delta 4$, що виникає через неоднакове зусилля притиску губки до деталі, що вимірюється і деформації контрольованої поверхні вимірювальними губками;

- похибка $\Delta 5$, що виникає через відхилення температури виробу і ШЦ від нормальної температури. В процесі вимірювання ШЦ, а іноді і контрольовану деталь тримають в руках. Тому температура вимірюваної деталі та ШЦ змінна;

- похибка $\Delta 2$, що виникає від перекосів губок ШЦ щодо вимірюваної деталі.

Сумарна похибка виражається як:

$$\Delta\Sigma = \pm 2\sigma = \sqrt{\Delta 1^2 + \Delta 2^2 + \Delta 3^2 + \Delta 4^2 + \Delta 5^2 + \Delta 6^2}, \quad (1.1)$$

У електронного ШЦ, додатково виникає похибка $\Delta 7$ через помилки інкрементного ємнісного перетворювача, але відсутня похибка штрихових шкал $\Delta 1$ і відліку по ним $\Delta 3$. Таким чином, похибка електронного ШЦ обчислюється за формулою:

$$\Delta\Sigma = \pm 2\sigma = \sqrt{\Delta 2^2 + \Delta 4^2 + \Delta 5^2 + \Delta 6^2 + \Delta 7^2}, \quad (1.2)$$

З (1.1) і (1.2) випливає, що основні і найбільш значущі складові сумарної похибки механічного та електронного ШЦ - похибка через порушення принципу Аббе і температурна похибка у обох ШЦ однакові. Тому наявність інкрементного перетворювача і цифрового відліку не підвищує точність ШЦ.

Таким чином, електронний ШЦ не підвищує точність вимірювання ШЦ, незважаючи на меншу дискретність відліку і зручне і правильне зчитування показань.

Фірни - виробники часто приносять емпіричні формули для розрахунку похибки вимірювання. Так, фірма Tesa (Швейцарія) наводить такі

формули для орієнтовного розрахунку гранично допустимої похибки вимірювання:

- ШЦ з відліком за ноніусом або циферблату з ціною поділки 0,1 або 0,05 мм

$$\Delta_{\text{lim}} = (20 + \ell / 10 \text{ мм}) \text{ мкм}, \quad (1.3)$$

- ШЦ з ціною поділки ноніуса 0,02 мм або з цифровим відліком з ціною поділки 0,01 мм

$$\Delta_{\text{lim}} = (22 + \ell / 50 \text{ мм}) \text{ мкм}, \quad (1.4)$$

Однак у всіх випадках гранично допустима похибка вимірювання ШЦ буде не менше 50 мкм.

Штангенциркулі з штриховим і цифровим відліком випускають і калібрують в відповідно до ГОСТ 166-89 і міжнародним стандартом DIN 862.

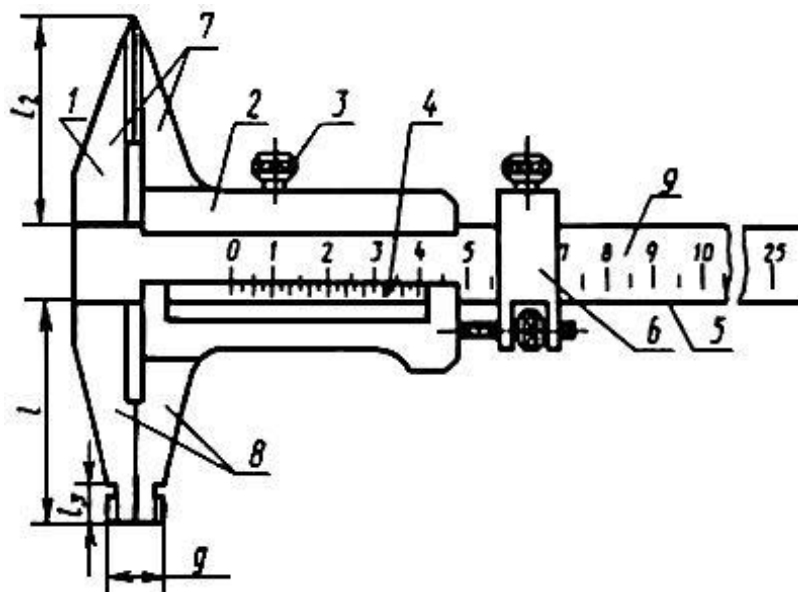
Слід також зазначити, що ШЦ зручно вимірювати розміри до 100-200 мм. Вимірювання деталей більшого розміру особливо більше 500 мм вкрай складно і вимагає певного досвіду.

Таким чином, в даний час випускають і широко застосовують дві моделі ШЦ - механічний зі штриховим відліком і електронний з цифровим відліком. Але електронний ШЦ настільки зручний в експлуатації і в найближчому майбутньому він, мабуть, поступово витіснить механічний ШЦ [5].

2 ОГЛЯД ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ,ЩО ПІДЛЯГАЄ КАЛІБРОВЦІ.ПОВІРКА ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ. КАЛІБРОВКА

2.1 Технічні вимоги до штангенциркуля ШЦ-П

Штангенциркуль типу ШЦ- П (двосторонній)



1 - штанга; 2 - рамка; 3 - затискає елемент; 4 - ноніус; 5 - робоча поверхня штанги; 6 - пристрій тонкої установки рамки; 7 - губки з матеріалами кромки вимірювальними поверхнями для вимірювання зовнішніх розмірів; 8 - губки з плоскими і циліндричними вимірювальними поверхнями для вимірювання зовнішніх і внутрішніх розмірів відповідно; 9 - шкала штанги

Рисунок 2.1 – Креслення ШЦ – П

Діапазон вимірювань від 0 до 150 мм, дозвіл складає 0,05 мм (значення ціни поділки основної шкали становить 1 мм, значення ціни поділки ноніуса - 1/20 мм).

Виліт губок l та l_1 для вимірювання зовнішніх розмірів і виліт губок l_2 та l_3 для вимірювання внутрішніх розмірів повинен відповідати зазначеним в табл.2.1

Таблиця 2.1 – Значення вильоту губок відповідно до ГОСТ 166-89

Діапазон вимірювання	l		l_1	l_2	l_3
	Не менш	Не більш	Не менш		
0-150	38	42	16	-	-

Штангенциркуль типу II з губками для вимірювання внутрішніх розмірів повинні мати циліндричну вимірювальну поверхню з радіусом не більше половини сумарної товщини губок (не більше $g/2$). Для нашого штангенциркуля ШЦ- II з границею вимірювання до 150 мм, значення g не повинно перевищувати значення 10 мм.

Межа похибки штангенциркуля при температурі навколишнього середовища (20 ± 5) °С при повірці його плоскопаралельними кінцевими мірами довжини зі сталі згідно ГОСТ 166-89 повинен відповідати значенню $\pm 0,05$.

Допуск площинності і прямолінійності вимірювальних поверхонь має становити 0,01 мм на 100 мм довжини більшої сторони вимірювальної поверхні штангенциркуля.

При цьому допустимі відхилення площинності і прямолінійності вимірювальних поверхонь повинні бути: 0,004 мм - для штангенциркуля зі значенням відліку за ноніусом, з ціною поділки шкали і кроком дискретності 0,05 мм і довжиною більшої сторони вимірювальної поверхні менше 40 мм.

Допуск паралельності на 100 мм довжини плоских вимірювальних поверхонь губок для вимірювання зовнішніх розмірів повинен бути: 0,02 мм - при значенні відліку за ноніусом, ціною поділки шкали і кроці дискретності 0,05 мм.

Мертвий хід мікрометричною пари пристрої для тонкої установки рамки не повинен перевищувати 1/3 обороту.

Відхилення розміру g губок з циліндричними вимірювальними поверхнями для вимірювання внутрішніх розмірів не повинні перевищувати: $\left(\begin{smallmatrix} +0,03 \\ 0 \end{smallmatrix} \right)$ мм при ціні поділки або значенні відліку за ноніусом 0,05 мм.

Рамка не повинна переміщатися по штанзі під дією власної ваги при вертикальному положенні штангенциркуля.

Для штангенциркуля з діапазоном вимірювання 0-150 мм допустимі значення зусилля переміщення рамки по штанзі вибирають з ряду 10, 15 Н.

Вимоги до шкали штанги і ноніуса.

Розташування площини шкали ноніуса відносно площини шкали штанги вказано на рисунку 2.2.

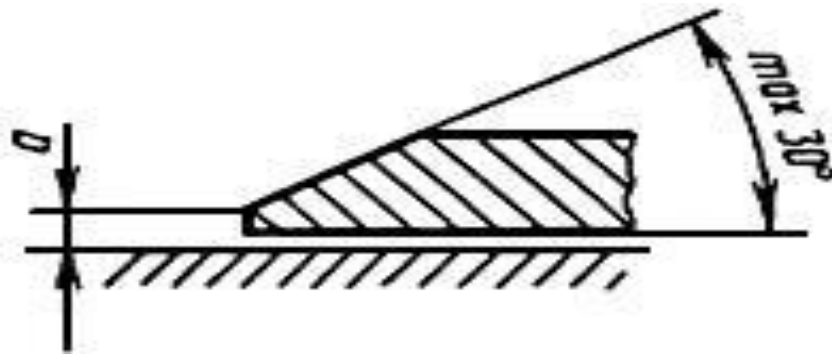


Рисунок 2.2 – Креслення розташування площини шкали ноніуса відносно площини шкали штанги

Відстань α від верхньої кромки краю ноніуса до поверхні шкали штанги не повинно перевищувати 0,25 мм для штангенциркуля зі значенням відліку 0,05.

Розміри штрихів шкал штанги і ноніуса повинні відповідати зазначеним нижче:

- ширина штрихів 0,08-0,20 мм;
- різницю ширини штрихів в межах однієї шкали (для шкали штанги на відстані більше 0,3 мм від краю шкали) і штрихів шкал штанги і ноніуса одного штангенциркуля не більше 0,03 мм при відліку за ноніусом 0,05 мм.

Твердість вимірювальних поверхонь штангенциркулем повинна бути: з інструментальної і конструкційної сталі - не менше 59 HRC₃ з високолегованої сталі - не менше 51,5 HRC₃.

Параметр шорсткості плоских і циліндричних вимірювальних поверхонь штангенциркулем – Ra ≤ 0,32 мкм по ГОСТ 2789; вимірювальних поверхонь кромки губок і плоских допоміжних вимірювальних поверхонь – Ra ≤ 0,63 мкм по ГОСТ 2789 [6].

Повірка штангенциркуля виконується згідно з ГОСТ 8.113 та МИ 1384.

2.2 Методика повірки штангенциркуля ШЦ-II

2.2.1 Операції і засоби перевірки

При проведенні повірки повинні бути виконані наступні операції і застосовані засоби перевірки з характеристиками, зазначеними в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Операції та засоби калібрування штангенциркуля

Операція	Номер пункту	Засоби калібрування і їх нормативні характеристики	Обов'язковість проведення операції при:		
			Випуск з виробництва	Випуск з ремонту	Експлуатація та зберігання
1	2	3	4	5	6
1 Зовнішній огляд	2.2.3.1	-	Так	Так	Так
2 Випробування	2.2.3.2	-	Так	Так	Так
Визначення метрологічних характеристик	2.2.3.3				

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
Визначення вильоту губок штангенциркуля	2.2.3. 3.1	Металева вимірювальна лінійка згідно з ГОСТ 427-75 з межею вимірювань 0-150 мм	Так	Так	Так
Визначення шорсткості вимірювальних поверхонь	2.2.3. 3.2	Профілограф по ГОСТ 19299-73 або профілометр по ГОСТ 19300-73; зразки шорсткості плоскі і опуклі з параметрами $Ra=0,32$ та $0,63$ мкм по ГОСТ 9378-75 або зразки деталей штангенциркуля з параметрами $Ra=0,32 \pm \frac{10}{20} \%$ мкм та $Ra=0,63 \pm \frac{10}{20} \%$ мкм	Так	Так	Ні
Визначення розмірів штрихів шкал і перекриття штрихів шкали штанги краєм ноніусу штангенциркуля	2.2.3. 3.3	Інструментальний мікроскоп типу БИМ по ГОСТ 8074-82	Так	Так	Ні
Визначення відстані від верхньої кромки краю ноніуса до поверхні шкали штанги	2.2.3. 3.4	Щупи товщиною 0,25 і 0,30 мм, клас точності 2 по ГОСТ 882-75	Так	Так	Ні
Визначення прямолінійності і вимірювальних поверхонь	2.2.3. 3.5	Зразок просвіту з плоскопаралельних кінцевих мір довжини зразкових 5-го	Так	Так	Так

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
<p>губок</p> <p>Визначення відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь губок</p>	<p>2.2.3. 3.6</p>	<p>розряду по ГОСТ 8.166-75 або по ГОСТ 9038-83 і плоска скляна пластина типу ПІ 60 мм, клас точності 2 по ГОСТ 2923-75, або брусок для визначення значення просвіту</p> <p>Пласкопаралельні кінцеві міри довжини зразкові 5-го розряду по ГОСТ 8.166-75 або класу точності 3 по ГОСТ 9038-83, ролик діаметром 5,493 мм, клас точності 1 по ГОСТ 2475-62, для зразка просвіту - лекальна лінійка типу ЛД, клас точності 1 по ГОСТ 8026-92,</p> <p>або плоскопаралельні кінцеві міри довжини зразкові 5го розряду по ГОСТ 8.166-75 (або класу точності 3 по ГОСТ 9038-83 і плоска пластина типу ПІ 60 мм, клас точності 2 по ГОСТ 2923-75), або брусок для визначення значення просвіту</p>	<p>Так</p>	<p>Так</p>	<p>Так</p>
<p>Визначення розміру зсунутих до зіткнення губок і відхилення від паралельності утворюють вимірювальних поверхонь губок для внутрішніх</p>	<p>2.2.3. 3.7</p>	<p>Мікрометр типу МК з межею вимірювання 0-25 мм, клас точності 2 по ГОСТ 6507-90, індикаторна Скоба</p>	<p>Так</p>	<p>Так</p>	<p>Так</p>

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
вимірювань штангенциркул я типу ЩЦ-II Визначення (контроль) зусилля переміщення рамки по штанзі штангенциркул я Визначення похибки штангенциркул я	2.2.3. 3.8	Циферблатні ваги з ціною поділки 5 г по ГОСТ 23711-79 з метрологічними параметрами по ГОСТ 23676-79, міри маси загального призначення по ГОСТ 7328-82 або підвіска	Так	Так	Ні
	2.2.3. 3.9	Пласкопаралельні зразкові кінцеві міри довжини 5-го розряду по ГОСТ 8.166-75 або класу точності 3 по ГОСТ 9038- 83, інструментальний мікроскоп по ГОСТ 8074-82 або універсальний вимірювальний мікроскоп по ГОСТ 14968-69, мікрометричний нутромір по ГОСТ 10-75	Так	Так	Так

При отриманні негативного результату будь-якої з операцій по таблиці перевірку штангенциркуля рекомендується припинити; наступні операції повірки проводять, якщо негативний результат попередньої операції не впливає на достовірність повірки подальшого параметра [7].

2.2.2 Умови перевірки і підготовка до неї

Під час проведення перевірки температура повітря в приміщенні повинна бути $(20 \pm 5) ^\circ \text{C}$.

Перед проведенням повірки повинні бути виконані наступні підготовчі роботи:

- штангенциркуль повинен бути промитий авіаційним бензином по ГОСТ 1012-72 або бензином-розчинником по ГОСТ 443-76, або миючими розчинами з пасиваторами, протертий чистої бавовняної серветкою і витриманий на робочому місці не менше 3 ч;

- штангенциркуль повинен бути розмагнічений; перевірку проводять на деталях з низьковуглецевої сталі масою не більше 0,1 м [7].

2.2.3 Проведення повірки штангенциркуля

2.2.3.1 Зовнішній огляд

При зовнішньому огляді повинна бути встановлено:

- відповідність штангенциркуля вимогам ГОСТ 166-80 в частині виразності та правильності оцифровки штрихів шкал, комплектності та маркування;

- наявність твердого сплаву на вимірювальних поверхнях губок штангенциркулем типу ШЦТ-I, затискного пристрою для затиску рамки, шкал на штанзі і рамці, покриття, мікрометричною подачі рамки штангенциркулів типів ШЦ-II і ШЦ-III при комплектації їх пристосуваннями для розмітки.

Не допускаються:

- помітні при візуальному огляді дефекти, що погіршують експлуатаційні якості і перешкоджають відліку показань;

- перекіс краю ноніуса до штрихів шкали штанги, що перешкоджає відліку показань.

2.2.3.2 Випробування

При випробуванні перевіряють:

- плавність переміщення рамки разом з мікрометричною подачею по штанзі штангенциркуля;

- можливість поздовжнього регулювання ноніуса штангенциркулів типу ШЦ-II;

- значення мертвого ходу мікрометричною пари; при цьому мертвий хід мікрометричною пари штангенциркулів, що випускаються з виробництва та ремонту, повинен відповідати вимогам ГОСТ 166-80, а штангенциркулів, що знаходяться в експлуатації, не повинен перевищувати $1 / 2$ обороту;
- відсутність переміщення рамки під дією власної маси;
- можливість затиску рамки в будь-якому положенні в межах діапазону вимірювання;
- знаходження рамки з ноніусом і рамки мікроподачі по всій їх довжині на штанзі при вимірюванні розмірів, рівних верхній межі вимірювання;
- відсутність поздовжніх подряпин на шкалі штанги при переміщенні по ній рамки (візуально).

2.2.3.3 Визначення метрологічних характеристик

2.2.3.3.1 Довжину вильоту губок визначають за допомогою металевої вимірювальної лінійки. Довжина вильоту губок штангенциркулем, що випускаються з виробництва, повинна відповідати значенням, встановленим ГОСТ 166-80.

2.2.3.3.2 Шорсткість вимірювальних поверхонь визначають по параметру ГОСТ 8.113-85 Державна система забезпечення єдності вимірювань (ГСІ). Штангенциркулі. Методика повірки за допомогою профілометра, профілографа або порівнянням із зразками шорсткості.

Примітка. При відсутності зразків шорсткості рекомендується застосовувати деталь-губку штангенциркуля, атестована за методикою, викладеною в ГОСТ 8.300-78.

2.2.3.3.3 Розміри штрихів шкал і перекриття штрихів шкали штанги краєм ноніуса штангенциркуля визначають за допомогою приладів, зазначених у таблиці. На кожному штангенциркулем перевіряють не менше п'яти штрихів штанги і п'яти штрихів ноніуса.

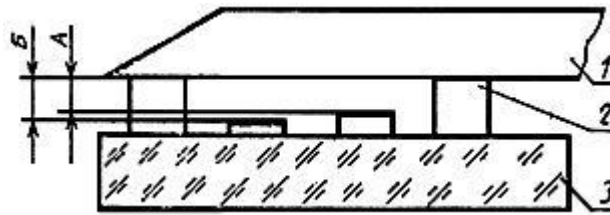
Значення перекриття штрихів шкали штанги краєм ноніуса допускається визначати візуально.

Допускається ширину штрихів і значення перекриття штрихів шкали штанги краєм ноніуса визначати на трьох штангенциркулем з партії. Розміри штрихів штанги і ноніуса і значення перекриття штрихів шкали штанги краєм ноніуса повинні відповідати значенням, зазначеним у ГОСТ 166-80.

2.2.3.3.4 Відстань від верхньої кромки краю ноніуса до поверхні шкали штанги визначають щупом в трьох місцях по довжині штанги. Щуп укладають на штангу поруч з ноніусом. Край скоса ноніуса не повинен бути вище площини щупа.

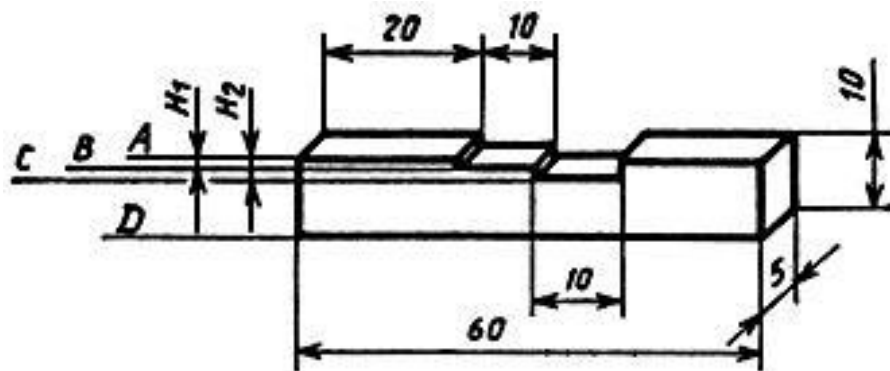
Відстань від верхньої кромки краю ноніуса до поверхні шкали штанги має відповідати вимогам ГОСТ 166-80. У штангенциркулів, що випускаються з ремонту, відстань від верхньої кромки краю ноніуса до поверхні шкали штанги можна перевіряти визначенням паралакса в трьох точках по шкалі штанги і в трьох точках по шкалі ноніуса. Один з штрихів ноніуса поєднують з будь-яким штрихом штанги і роблять відлік, після чого нахиляють штангенциркуль на $10-15^\circ$ вздовж довгого ребра штанги. Показання штангенциркуля при нахилі штанги в ту або іншу сторону не повинні змінюватися більш ніж на одну поділку ноніуса.

2.2.3.3.5 Значення просвіту визначають візуально - порівнянням його з зразком (рисунок 2.3) або бруском для визначення значення просвіту (рисунок 2.4) – для визначення значення просвіту на вимірювальну поверхню А бруска накладають лекальну лінійку. Відхилення від площинності не повинне перевищувати значень, встановлених ГОСТ 166-80.



- 1 - лекальна лінійка;
 2 - плоскопараллельні кінцеві міри довжини;
 3 - плоска скляна пластина;
 А, Б - значення просвіту

Рисунок 2.3 – Зразок для визначення значення просвіту

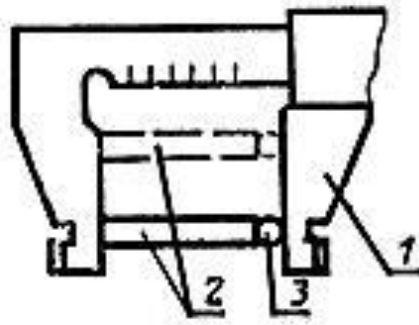


- А, В, С, D - вимірювальні поверхні бруска

Рисунок 2.4 – Брусок для визначення значення просвіту

Для штангенциркулів, що випускаються з ремонту і знаходяться в експлуатації, допускають завали на відстані 0,5 мм від країв вимірювальної поверхні.

2.2.3.3.6 Відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь губок визначають за допомогою кінцевих мір довжини і ролика (рисунок 2.5) при трьох положеннях рухомий губки, близьких до меж вимірювань і середині діапазону вимірювання штангенциркуля.



- 1 - губка;
 2 - кінцева міра довжини;
 3 - ролик

Рисунок 2.5 – Ролик

За відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь губок приймають найбільшу різницю вимірюваних відстаней при кожному положенні рухомої губки, яка не повинна перевищувати значень, встановлених ГОСТ 166-80.

Допускається при випуску з виробництва штангенциркулів з межею вимірювання до 400 мм визначати відхилення від паралельності губок по просвіту між вимірювальними поверхнями при зрушених губах як при не зтягнутому, так і при зтягнутому затиску рамки. При цьому значення просвіту не повинно перевищувати 0,008 мм - при значенні відліку за ноніусом 0,05 мм, 0,012 мм - при значенні відліку за ноніусом 0,1 мм.

Значення просвіту визначають візуально порівнянням із зразком (рисунок 2.3) або бруском для визначення значення просвіту (рисунок 2.4).

У штангенциркулем, що мають мікроподачі, рухливу губку переміщують при її допомогі.

Допускається для штангенциркулів з верхньою межею вимірювання понад 400 мм визначати відхилення від паралельності губок без застосування ролика і в точках, відповідних нижньому і верхньому меж вимірювань.

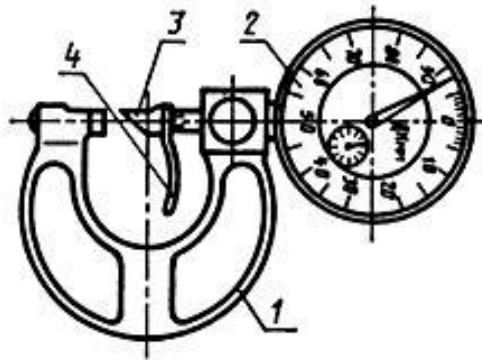
Для штангенциркулів, що випускаються з ремонту і знаходяться в експлуатації, допускається замінювати визначення відхилення від паралельності визначенням похибки штангенциркуля по п. 2.2.3.3.9 при двох положеннях кінцевої міри довжини, зазначених на рисунок 2.5.

Таблиця 2.3 – Значення просвіту при визначенні відхилення від площинності, прямолінійності і паралельності вимірюваних поверхонь губок для п. 2.2.3.3.5 та 2.2.3.3.6

Номер пункту	H_1	H_2
2.2.3.3.5	$0,004 \pm 0,0004$	$0,007 \pm 0,0004$
2.2.3.3.6	$0,008 \pm 0,0008$	$0,012 \pm 0,0008$

2.2.3.3.7 Розмір зсунутих до зіткнення губок і відхилення від паралельності утворюють вимірювальних поверхонь губок для внутрішніх вимірювань штангенциркулем типів ШЦ-ІІ визначають мікрометром або індикаторної скобою (рисунок 2.6) при затиснутому стопорному гвинті рамки. При визначенні розміру та відхилення від паралельності вимірюваних поверхонь губок для внутрішніх вимірювань штангенциркуля індикаторну скобу встановлюють на розмір здвоєних губок по кінцевий міру довжини.

При визначенні розміру по циліндричним вимірювальним поверхонь губок бічні поверхні встановлюють в одній площині і знаходять найбільший розмір.



1 - скоба мікрометра типу МК з межею вимірювання 0-25 мм; 2 - індикатор годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм, границею вимірювання 0-10 мм по ГОСТ 577-68; 3 - спеціальний наконечник; 4 – аретир

Рисунок 2.6 – Індикаторна скоба

Допускається зміщення лінії найбільшого розміру від осі симетрії губок при повороті мікрометра або індикаторної скоби щодо осі штанги на кут не більше 15 °.

Розмір зсунутих до зіткнення губок штангенциркулем, що випускаються з виробництва, зазначений у маркуванні, повинен виражатися цілим числом міліметрів. Відхилення виміряного розміру від вказаної у маркуванні не повинно перевищувати значень, встановлених ГОСТ 166-80.

У штангенциркулів, що випускаються з ремонту і знаходяться в експлуатації, розмір зсунутих до зіткнення губок повинен бути не менше: 7 мм - для штангенциркулів з межею вимірювання до 400 мм, 10 мм. Розмір, зазначений у маркуванні, може дорівнювати цілому числу десятих часток міліметра.

Для штангенциркулів, що випускаються з ремонту і знаходяться в експлуатації, відхилення виміряного розміру від вказаної у маркуванні не повинно перевищувати $\pm 0,03$ мм.

При визначенні відхилення від паралельності утворюють вимірювальних поверхонь губок розмір зсунутих до зіткнення губок вимірюють в двох або трьох перетинах по довжині губок. Різниця між відліками дорівнює відхиленню від паралельності і не повинна перевищувати значень, встановлених ГОСТ 166-80.

2.2.3.3.8 Зусилля переміщення рамки по штанзі штангенциркуля визначають за допомогою ваг. Штангу штангенциркуля наголошують в чашку ваг; при переміщенні рамки по штанзі знімають показання за шкалою ваг. За значення зусилля переміщення приймають найбільше значення різниці показань ваг і маси штангенциркуля.

Зусилля переміщення рамки по штанзі штангенциркуля не повинно перевищувати значень, встановлених ГОСТ 166-80.

2.2.3.3.9 Похибка штангенциркулів визначають по кінцевих мір довжини. Блок кінцевих мір довжини поміщають між вимірювальними поверхнями губок штангенциркуля. Зусилля зрушення губок має забезпечувати нормальне ковзання вимірювальних поверхонь губок по вимірювальним поверхонь кінцевих мір довжини при відпущеному стопорному гвинті рамки. Довге ребро вимірювальної поверхні губки повинно бути перпендикулярно до довгого ребру кінцевої міри довжини і перебувати в середині вимірювальної поверхні.

В одній з повіряємих точок похибка визначають при затиснутому стопорному гвинті рамки, при цьому має зберігатися нормальне ковзання вимірювальних поверхонь губок по вимірювальним поверхонь кінцевих мір.

У штангенциркулів зі значенням відліку за ноніусом 0,05 мм, що випускаються з виробництва, похибка визначають в шести точках; допускається визначати похибку в трьох точках за умови відхилення від прямолінійності базової поверхні штанги, по якій базується рамка, не більше 0,02 мм.

Примітка. Відхилення від прямолінійності базової поверхні штанги визначають за допомогою лекальної лінійки типу ЛД, класу точності 1,

довжиною 320 мм по ГОСТ 8026-75 і щупа товщиною 0,02 мм, класу точності 2 по ГОСТ 882-75.

У штангенциркулів, що випускаються з ремонту і знаходяться в експлуатації, похибка визначають в трьох точках, рівномірно розташованих по довжині штанги і ноніуса.

Похибка визначають за допомогою розмічальних губок у штангенциркулів типу ШЦ-ІІ одночасно з визначенням похибки вимірювальних губок в трьох точках, рівномірно розташованих по довжині штанги і ноніуса.

Похибка для кожної пари губок не повинна перевищувати значень, встановлених ГОСТ 166-80.

Одночасно перевіряють нульову установку штангенциркуля[7].

2.3 Основні поняття калібрування

Калібрування - операція, яка, при зазначених умовах, на першому етапі встановлює співвідношення між значеннями величини, забезпеченої вимірювальним еталоном з невизначеністю вимірювання, і відповідними показаннями зі зв'язаною невизначеністю вимірювання, і на другому етапі використовує цю інформацію, для встановлення співвідношення, необхідного для отримання результату вимірювання з показань.

Калібрування може бути виражена твердженням, калібрувальної функцією, калібрувальної діаграмою, або калібрувальної таблицею. У деяких випадках вона може складатися з адитивного або мультиплікативного виправлення ознаки зі зв'язаною невизначеністю [9].

Повірка - процес визначення органами державної метрологічної служби (або будь-якими іншими уповноваженими організаціями) придатності вимірювальних пристроїв до використання, здійснюваний на підставі експериментально встановлених метрологічних характеристик, а також підтверджує їх відповідність існуючим вимогам. Обов'язковій повірці

піддаються вимірювальні засоби, які підлягають (за технічними вимогами) державного метрологічного нагляду і контролю.

Калібрування - це сукупність деяких операцій, що визначають співвідношення між значеннями величин, отриманих за допомогою даного вимірювального приладу, і відповідними значеннями величин, встановлених за допомогою еталона. Калібрування проводиться для того, щоб визначити дійсні метрологічні характеристики конкретного вимірювального приладу. Зазвичай калібрування піддаються вимірювальні пристрої, які не потребують обов'язкового державного метрологічного нагляду і контролю.

Калібрування частково замінила раніше існуючу метрологічну атестацію і відомчу перевірку вимірювальних приладів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Порівняння операцій повірки і калібровки

Ознака	Повірка	Калібровка
Сфера розповсюдження	ЗВ, що підлягають державному метрологічному нагляду і контролю	ЗВ, які використовують у лабораторіях
Періодичність	Визначається НД	Визначає замовник
Умови проведення	Нормальні	Задає замовник
Метод	Передбачено НД	Встановлює замовник
Суть	Визначення МХ плюс повірка відповідності	Визначення МХ плюс внесення поправки
Оцінка характеристик точності результату	Не проводиться	Невизначеність вказується у калібровачному сертифікаті

Калібруванню підлягають:

- а) власні вихідні еталони та зразкові речовини лабораторії;
- б) засоби вимірювань лабораторії або взяті напрокат (в оренду), які застосовуються під час калібровки (випробувань);

в) обладнання лабораторії, якщо його параметри або характеристики значно впливають на результати випробувань (калібрувань) [10].

2.4 Основні методи калібрування

Але тим не менше метрологічна служба підприємства зобов'язана виконувати певні вимоги. Основна вимога до метрологічної службі - забезпечення відповідності робочого засобу вимірювань державному еталону. Калібрування входить до складу національної системи забезпечення єдності вимірювань [11].

Виділяють чотири методи повірки (калібрування) засобів вимірювальної техніки:

- 1) метод безпосереднього порівняння з еталоном;
- 2) метод звірення за допомогою компаратора;
- 3) метод прямих вимірювань величини;
- 4) метод непрямих вимірювань величини.

Вимоги до методів калібрування:

- повинні відповідати потребам замовника;
- повинні відповідати проведеним в лабораторії калібрування;
- задаються замовником або (якщо не задаються) вибираються калібрувальної лабораторії;
- повинні підходити для використання за призначенням і бути достовірними.

3 ОСНОВНІ ЕТАПИ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

3.1 Основні положення та визначення щодо оцінки невизначеності вимірювань

Невизначеність вимірювання не є негативним параметром, який пов'язаний з результатом вимірювання та який характеризує розкид значень, які могли б бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині [4].

Вимірюваними величинами є такі особливі величини, значення яких можна визначити за допомогою вимірювання. При калібруванні зазвичай мають справу тільки з однією вимірюваною величиною, яка також зветься "вихідна величина Y ", яка залежить від кількості вхідних величин X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) через відношення:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (3.1)$$

Функція моделі f описує одночасно процедуру вимірювання та метод оцінювання. Вона показує, як значення вихідної величини Y виходить із значень вхідних величин X_i . У більшості випадків вона складається з одного аналітичного виразу, але вона також може бути складена з групи таких виразів, які включають поправки і поправочні коефіцієнти для систематичних ефектів, що, таким чином, призводить до складної залежності, яка може бути виражена не однією функцією. Крім цього, f також може оцінюватися експериментально або існувати у якості комп'ютерного алгоритму, який має оцінюватись чисельно, або ж вона може складатися як комбінація з усіх цих форм.

Залежно від способу, за яким були визначені значення і пов'язані з ними невизначеності вимірювання, вхідні величини X_i поділяються на такі дві категорії:

а) величини, оцінки яких, включаючи пов'язані з ними невизначеності вимірювання, можуть визначатися безпосередньо в поточному вимірі. Ці значення можуть бути отримані, наприклад, з одного спостереження або повторних спостережень або засновані на відповідному експериментальному досвіді. Вони можуть включати визначення поправок в показання приладу, а також поправки величини, що мають вплив, такі як температура навколишнього середовища, тиск або вологість;

б) Величини, оцінки яких, включаючи пов'язані з ними невизначеності вимірювання, вносяться зовнішніми джерелами, такими як відкалібрований еталон або сертифікований еталонний матеріал, або з еталонних даних з довідкової літератури.

Для випадкової величини дисперсія її розподілу або позитивний квадратний корінь дисперсії, що зветься стандартним відхиленням, використовується в якості міри дисперсії значень. Стандартна невизначеність вимірювання, пов'язана з вихідною оцінкою або результатом вимірювання y , що позначається як $u(y)$, є стандартним відхиленням вимірюваної величини Y . Вона визначається з оцінок x_i вхідних величин X_i і пов'язаних з ними стандартних b невизначеностей $u(x_i)$.

Стандартна невизначеність, пов'язана з оцінкою вимірюваної величини, має таку ж розмірність, як і вимірюване значення. У деяких випадках раціонально застосовувати відносну стандартну невизначеність вимірювання, яка є стандартною невизначеністю вимірювання, пов'язаного з оцінкою, розділеною на модуль (абсолютне значення) оцінки, і тому є безрозмірною. Її застосування є неможливим, коли значення оцінки дорівнює нулю.

3.2 Оцінювання невизначеності вимірювання оцінок вхідних величин

3.2.1 Загальні положення

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, при якому 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 Б для оцінювання стандартної невизначеності – це метод, при якому невизначеність вимірювання оцінюється іншими способами, ніж статистичний аналіз ряду спостережень. У цьому випадку оцінка стандартної невизначеності ґрунтується на інших наукових знаннях.

3.2.2 Метод А для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання

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.

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 , середнє арифметичне значення або середнє значення окремих спостережуваних значень q_j ($j=1,2, \dots, n$)

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j, \quad (3.2)$$

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

а) Оцінка дисперсії розподілу ймовірностей, що лежить в основі, є експериментальною дисперсією $s^2(q)$ значень (q) , що отримуються наступним шляхом:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2, \quad (3.3)$$

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 як:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n}, \quad (3.4)$$

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:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n}, \quad (3.5)$$

б) Якщо для вимірювання, проведеного по певному методу вимірювання, який перебуває під статистичним контролем, є комбінована або сумісна оцінка дисперсії s_p^2 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 допомогою вищевказаної формули (3.5).

3.2.3 Метод Б для оцінювання стандартної невизначеності вимірювання

При оцінюванні стандартної невизначеності вимірювання за типом Б 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, отриманні в результаті досвіду або загальних знань про поведінку і властивості застосовуваного Матеріала або приладів;
- дані виробника;
- значення, що містяться в свідченнях про калібрування або інших посвідченнях;
- невизначеності вимірювання, пов'язані з довідковими значеннями з довідкової літератури.

Осміслене 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 обґрунтована 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:

а) Якщо відомо тільки одиначне 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 пункті (б) має бути розглянутим.

б) 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 $u(x_i)$.

в) 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 для випадку (б), описаним вище, отримуємо:

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-), \quad (3.6)$$

для оцінки вхідної величини і

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2, \quad (3.7)$$

для квадрата стандартної невизначеності вимірювання. Якщо різниця між граничними значеннями описується за допомогою $2a$, то рівність (3.7) може також бути записано у формі:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3} a^2, \quad (3.8)$$

Прямокутна щільність ймовірностей є відповідним теоретико ймовірнісним 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.

3.3 Оцінка стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаної з оцінкою вихідної величини

3.3.1 Для некорельованих вхідних величин квадрат стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаний з оцінкою y вихідної величини виражається через:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2 y, \quad (3.9)$$

Примітка: У вимірювальній техніці є випадки, при калібрування зустрічаються рідко, в яких функція моделі сильно нелінійна або деякі коефіцієнти чутливості [див. Рівність (3.10) і (3.11)] приймають нульове значення або зникають. Тоді необхідно додавати в рівність (3.9) член більш високого порядку. Опис цього особливого випадку дається в [8].

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

$$u_i(y) = c_i u(x_i), \quad (3.10)$$

c_i є коефіцієнтом чутливості, що належать до вхідних величин x_i , який для вхідної оцінки x_i розраховується як приватна похідна функції моделі f по X_i :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{x_1=x_1, \dots, x_N=x_N}, \quad (3.11)$$

3.3.2 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 рівняння (3.11) або за допомогою чисельних методів, тобто так, що розраховуються зміни оцінки y 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 y вихідної величини цілеспрямовано визначати експериментальним способом, при якому повторюють вимір, наприклад, при $x_i \pm u(x_i)$.

3.3.3 В той час як $u(x_i)$ завжди постійна, вклад невизначеності $u_i(y)$ відповідно до рівності (3.10) залежно від знака коефіцієнта чутливості c_i може приймати позитивні або негативні значення. У разі корельованих вхідних величин знак $u_i(y)$ повинен обов'язково прийматися до уваги.

3.3.4 Якщо функція моделі f є сумою або різницею вхідних величин X_i :

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i, \quad (3.12)$$

то також оцінка вихідної величини відповідно до рівності (3.2) дає в результаті відповідну суму або різницю оцінок вхідних величин:

$$y = \sum_{i=1}^N p_i x_i, \quad (3.13)$$

Коефіцієнти чутливості, рівні p_i , і рівність (3.9) призводять до:

$$u^2(y) = p_i^2 u^2(x_i), \quad (3.14)$$

3.3.5 Якщо функція моделі f є твором або приватним вхідних величин X_i :

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^p, \quad (3.15)$$

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

$$y = c \prod_{i=1}^N x_i^p, \quad (3.16)$$

У цьому випадку коефіцієнти чутливості рівні $p_i y/x_i$, і з рівності (3.9) виходить рівність аналогічне рівності (3.14), якщо при цьому використовуються відносні стандартні невизначеності вимірювання $w(y) = u(y)/|y|$ і $w(x_i) = u(x_i)/|x_i|$:

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i), \quad (3.17)$$

3.3.6 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.

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

а) 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 або якщо

б) одна з вхідних величин X_i і X_k може розглядатися як константа або якщо в) немає ніяких причин для кореляції між вхідними величинами X_i і X_k . Іноді кореляції можуть виключатися з допомогою відповідного вибору функції моделі.

3.3.8 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.

3.3.9 Формальний приклад, який наведено для такого табличного розташування і є дійсним для некорельованих вхідних величин, представлений в таблиці 3.1. 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.

Таблиця 3.1 – 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 $u x_i$	Ймовірність	Коефіцієнт чутливості	Внесок невизначеності (y)
X_1	X_1	$U(X_1)$		C_1	$U_1(y)$
X_2	X_2	$U(X_2)$		C_2	$U_2(y)$
X_n	X_n	$U(X_n)$		C_n	$U_n(y)$
Y	y				$u(y)$

3.4 Розширена невизначеність

3.4.1 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 у вихідної величини, на коефіцієнт охоплення

$$k: U = k_u(y), \quad (3.18)$$

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.

3.4.2 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.

3.4.3 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.

3.4.4 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 такий 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.

3.4.5 Навіть, коли нормальний розподіл може прийматися, може ще статися, що невизначеність вимірювання, пов'язана з вихідною оцінкою, є не досить надійною.

3.4.6 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%.

3.5 Інструкція для покрокового визначення невизначеності вимірювання

Нижче складена інструкція для покрокового застосування цього документа для розрахунку невизначеності вимірювання на практиці:

а) Слід математично сформулювати зв'язок між вимірюваною величиною (вихідний величиною) Y і вхідними величинами X_i у вигляді відповідного виразу (3.1). У випадку прямого порівняння двох еталонів вираз буде цілком простим, наприклад, $Y = X_1 + X_2$.

б) Необхідно встановити і врахувати всі значимі поправки.

в) При аналізі невизначеності необхідно перерахувати всі причини невизначеності вимірювання відповідно до розділу 3.2.3

г) Для повторно вимірюваних величин слід визначити стандартну невизначеність вимірювання відповідно в розділі 3.2.2

д) Для одиничних значеннях, наприклад, для значень, отриманих з попередніх вимірювань, для поправок або для значень з літератури, слід застосовувати стандартну невизначеність вимірювання $u(x_i)$, якщо вона вказана, або може розраховуватися відповідно до пункту 3.2.3 (а). При цьому слід звертати увагу на те, в якій формі вказується невизначеність вимірювання (стандартна невизначеність вимірювання - розширена невизначеність вимірювання). Якщо немає ніякого значення, з якого може бути оцінена стандартна невизначеність, то значення для $u(x_i)$ слід визначати на підставі відповідного метрологічного досвіду.

е) Для вхідних величин, розподіл ймовірностей яких відомо або може бути припущено на підставі наявної інформації, математичне очікування і

стандартну невизначеність $u(x_i)$ слід розраховувати відповідно до п. 3.2.3 (б). Якщо відомі або можуть бути оцінені тільки верхня або нижня межі неясності (недостовірності) або надійність вхідних величини, то стандартну невизначеність вимірювання $u(x_i)$ слід оцінювати відповідно до п. 3.2.3 (в).

ж) Для кожної вхідної величини X_i слід розрахувати внесок $u_i(y)$ в невизначеність вимірювання, яка пов'язана з оцінкою у вихідної величини. Він виходить як у виразах (3.10) або (3.11) зі стандартної невизначеності вимірювання $u(x_i)$, пов'язаної з оцінкою x_i вхідної величини, за допомогою множення на коефіцієнт чутливості c_i . Щоб отримати стандартну невизначеність $u(y)$, пов'язану з значенням вимірюваної величини, квадрати вкладів невизначеності слід підсумувати у відповідності з виразом (3.9).

з) Розширену невизначеність вимірювання U слід визначати через дві стандартної невизначеності $u(y)$, пов'язаної з оцінкою вихідної величини, і коефіцієнта розширення k , обраним відповідно до розділу 3.4.

и) Результат вимірювання, який включає оцінку у вимірюваної величини, пов'язану з нею розширену невизначеність вимірювання U і коефіцієнт чутливості k , слід вказувати у свідоцтві калібрування відповідно до розділу 3.5.

4 ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ ШЦ- II

4.1 Калібрування штангенциркуля

4.1.1 Сталевий штангенциркуль калібрується із застосуванням сталевих кінцевих мір 1-го класу, які служать в якості робочого еталона. Діапазон вимірювання штангенциркуля становить від 0 до 150 мм. Розрішення складає 0,05 мм (значення ціни поділки основної шкали становить 1 мм, значення ціни поділки ноніуса - 1/20 мм).

При калібрування використовуються кілька кінцевих мір з номінальними довжинами в діапазоні 0,5 - 150 мм. Вони вибираються таким чином, щоб точки вимірювання лежали приблизно на рівній відстані один від одного (наприклад, 0 мм, 50 мм, 100 мм, 150 мм), але складали різні значення шкали ноніуса (наприклад, 0,0 мм, 0,3 мм, 0,6 мм, 0,9 мм).

У прикладі розглядається калібрування точка 150 мм для виміру зовнішніх розмірів. Перед калібруванням багаторазово контролювалося стан штангенциркуля.

Цей контроль стосувався залежності результату вимірювання від відстані об'єкта вимірювання до направляючої штангенциркуля (помилки Аббе), якості вимірювальних поверхонь п'ят штангенциркуля (площинність, паралельність, перпендикулярність) і функціонування механізмів кріплення.

4.1.2 Відхилення показання E_X штангенциркуля при заданій температурі $t_0=20^\circ\text{C}$ виходить із залежності:

$$E_X = l_{iX} - l_s + L_s \cdot \bar{\alpha} \cdot \Delta t + \delta l_{iX} + \delta l_M, \quad (4.1)$$

де l_{iX} показання штангенциркуля;

l_s – довжина використовуваної кінцевої міри;

L_s – номінальне значення використовуваної кінцевої міри;

$\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт теплового розширення матеріалів штангенциркуля і кінцевий заходи;

Δt – різниця температур між штангенциркулем і кінцевий заходом;

δl_{ix} – поправка на кінцеве дозвіл штангенциркуля;

δl_M – поправка на механічні ефекти, такі як існуюче вимірювальне зусилля, помилки Аббе, відхилення від площинності і паралельності вимірювальних поверхонь.

4.1.3 Робочі еталони (l_s, L_s) : довжини використовуваних як робочих еталонів кінцевих мір довжини разом з відповідними розширеними невизначеностями указуються в свідоцтві калібрування. Це свідчення підтверджує, що кінцеві міри довжини відповідають вимогам на кінцеві міри довжини 1-го класу згідно DIN EN ISO 3650, тобто що середня довжина кінцевої міри відповідає номінальній довжині в межах $\pm 0,08$ мм. Номінальна довжина кінцевої міри застосовується без поправки до її дійсної довжині, причому граничні межі приймаються як верхня і нижня межі області мінливості.

4.1.4 Температура ($\bar{\alpha}, \Delta t$) : через час, достатній для стабілізації, температура штангенциркуля і кінцевих мір довжини повинна знаходитися в межах $\pm 2^\circ\text{C}$. Середній коефіцієнт теплового розширення приймається рівним $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (невизначеність середнього теплового коефіцієнта розширення і різниці теплових коефіцієнтів розширення не прийнята до уваги; їх впливом в цьому випадку можна знехтувати).

4.1.5 Розділення штангенциркуля (δl_{ix}) : ціна поділки шкали ноніуса становить 0,05 мм. Тому передбачається, що варіація зчитувальних значень через кінцевого дозволу підпорядковується прямокутному розподілу з напівшириною інтервалу ± 25 мкм.

S10.6 Механічні ефекти (δl_M): ці ефекти включають застосовуване вимірювальне зусилля, помилки Аббе і зазор між напрямною і рухомій вимірювальній п'ятою. Додаткові ефекти можуть виникати, коли вимірювальні

поверхні п'ят мало плоскі, не паралельні один 56 одному і не перпендикулярні до напрямних. Мінімізувати витрати можна, взявши до уваги тільки загальну область можливих відхилень, лежачу в інтервалі ± 50 мкм.

4.1.7 Кореляція: вхідні величини розглядаються як некорельовані.

4.1.8 Вимірювання (l_{ix}): вимірювання повторювалися багаторазово без визначення розкиду спостережень. Отже, невизначеність через обмеженого числа повторних спостережень, не вносить вкладу. Результат вимірювання для 150-тиміліметровою кінцевий міри довжини склав 150,10 мм.

4.1.9 Бюджет невизначеності наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Бюджет невизначеності δl_x

Величин а x_i	Оцінк а x_i , мм	Стандартна невизначеніст ь $u(x_i)$	Розподіл	Коефіцієнт невизначенос ті c_i	Внесок невизначенос ті $u_i(y)$
l_{ix}	150, 10	-	-	-	-
L_s	150	0,46 мкм	прямокутний	-1,0	-0,46 мкм
Δt	0	1,15 К	прямокутний	-1,7 мкм К	2,0 мкм
δl_{ix}	0	15 мкм	прямокутний	1,0	15 мкм
δl_M	0	29 мкм	прямокутний	1,0	29 мкм
E_x	0,10				33 мкм

4.1.10 Розширена невизначеність:

При оцінці невизначеності результату явно домінують вклади від вимірювального зусилля і кінцевого дозволу шкали ноніуса. Остаточний розподіл не є нормальним, а скоріше трапецеїдальним з відношенням півширини меншого підстави до напівширину більшого підстави рівним $\beta = 33,0$. Тому метод визначення ефективних ступенів свободи, описаний в додатку до DKD-3 (англ. EA-4/02), не придатний). Коефіцієнт охоплення, відповідний

цьому трапеційдальному розподілу, $k = 1,83$ виходить з виразу (4.1.10) глави 4.1.13 (математичні посилання). Тому

$$U = k \cdot u(E_x) = 1,83 \cdot 0,033 \text{ мм} \cong 0,06 \text{ мм}, \quad (4.2)$$

4.1.11 Повний результат вимірювання:

У каліброваній точці 150 мм виміряне відхилення показань штангенциркуля склало $(0,10 \pm 0,06 \text{ мм})$.

Зазначена розширена невизначеність вимірювання отримана множенням стандартної невизначеності вимірювання на коефіцієнт охоплення $k = 1,83$. Вона відповідає передбачуваному трапеційдальному розподілу з імовірністю охоплення приблизно 95%.

4.1.12 Додаткові коментарі:

Використовуваний метод для оцінки коефіцієнта охоплення пов'язаний з тим фактом, що в невизначеності вимірювання, пов'язаної з результатом, домінують два джерела: механічні ефекти і кінцеве дозвіл шкали ноніуса.

Тому необґрунтовано припускати нормальний розподіл вихідної величини і застосовувати умови EAL-R2, розділ 3.4.6. Враховуючи, що на практиці ймовірність і щільність ймовірності може визначатися тільки з точністю від 3% до 5%, розподіл, по суті буде трапеційдальним; воно виходить через згортку двох домінуючих вкладів, підпорядкованих прямокутному розподілу. Напівширина підстави і вершини отриманої симетричною трапеції складе 75 мкм і 25 мкм відповідно; в цьому випадку приблизно 95% площі трапеції міститиметься в інтервалі ± 60 мкм від її осі симетрії, що відповідає коефіцієнту охоплення $k = 1,83$.

4.1.13 Математичне примітка: Якщо вимірювальна ситуація така, що два вклади в невизначеність у бюджеті можна ідентифікувати як домінуючі, то прийнятно використовувати метод, представлений в розділі 4.1.14, коли обидва домінуючих вкладу - наприклад, вклади в невизначеність з індексами 1 і 2 -

підсумовані в загальний внесок. Стандартна невизначеність для вимірюваної величини u може бути в цьому випадку записана у формі

$$u(y) = \sqrt{u_0^2(y) + u_R^2(y)}$$

де

$$u_0(y) = \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y)}, \quad (4.3)$$

вказує на загальний внесок двох домінуючих джерел, а загальний внесок у невизначеність залишилося не домінуючих джерел запишеться як

$$u_R(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}, \quad (4.4)$$

Коли обидва домінуючих вкладу описуються прямокутними розподілами з напівширину інтервалів a_1 і a_2 , результатом їх згортки є симетричне трапецієподібно розподіл з напівшириною підстави і вершини відповідно (приклад на рисунку 4.1)



Рисунок 4.1 – Уніфікована симетрична трапецеїдальних щільність розподілу ймовірностей зі значенням параметра точки перегину $\beta = 0,33$ є результатом згортки двох прямокутних розподілів.

$$a = a_1 + a_2 \quad b = |a_1 - a_2|, \quad (4.5)$$

Розподіл можна виразити в загальній формі

$$\varphi(y) = \frac{1}{a(1+\beta)} \cdot \begin{cases} 1 & |y| < \beta \cdot a \\ \frac{1}{1-\beta} \left(1 - \frac{|y|}{a}\right) & \beta \cdot a \leq |y| \leq a, \\ 0 & a < |y| \end{cases} \quad (4.6)$$

Співвідношення довжин підстави і вершини трапеції позначається через параметр точки перегину і виражається:

$$\beta = \frac{b}{a} = \frac{|a_1 - a_2|}{a_1 + a_2}, \quad (S10.7)$$

Квадрат стандартної невизначеності вимірювання, визначений з трапецеїдального розподілу використовуючи формулу (4.6), (тобто дисперсія) є

$$u^2(y) = \frac{a^2}{b} (1 + \beta^2), \quad (4.8)$$

Використовуючи розподіл з виразу (4.6) була виведена залежність коефіцієнта охоплення від ймовірності охоплення

$$k(p) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}} \cdot \begin{cases} \frac{p(1+\beta)}{2} & \frac{p}{2-p} < \beta \\ 1 - \sqrt{(1-p)(1-\beta^2)} & \beta \leq \frac{p}{2-p} \end{cases}, \quad (4.9)$$

Рисунок 4.2 зображує залежність коефіцієнта охоплення k для ймовірності охоплення 95% від значення параметра точки перегибу β .

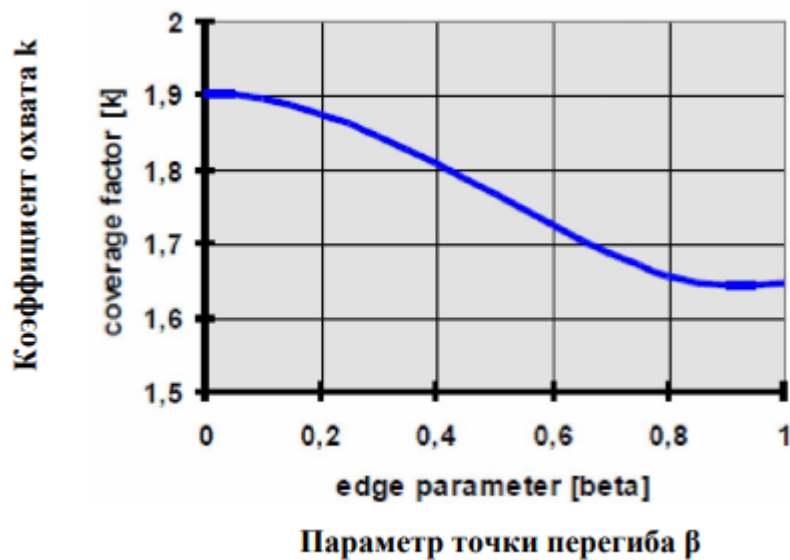


Рисунок 4.2 – Залежність коефіцієнта охоплення k від параметра точки перегибу β трапецеїдального розподілу для ймовірності охоплення 95%.

Коефіцієнт охоплення для ймовірності охоплення 95%, відповідної трапецеїдальному розподілу з параметром точки перегину $\beta = 0,33$ визначається зі співвідношення

$$k = \frac{\sqrt{(1-p)(1-\beta^2)}}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}}, \quad (4.10)$$

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз на відповідність штангенциркуля ШЦ технічним вимогам згідно з ГОСТ 166-89 та встановлено порядок проведення повірки (калібровки) штангенциркуля згідно ГОСТ 8.113-85.

Приведені основні методи калібровки в акредитованих лабораторіях.

Розглянуті основні етапи оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювальних приладів. А також приведена інструкція для покрокового визначення невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювальних приладів.

Досліджена методика калібрування штангенциркуля ШЦ і розроблена процедура оцінювання невизначеності вимірювань при його калібрування, що включає бюджет невизначеності.

Складено бюджет невизначеності і розглянутий приклад оцінювання невизначеності під час калібрування штангенциркуля.

Розроблена методика оцінювання невизначеності під час калібрування штангенциркуля може бути рекомендована для застосування в калібрувальних лабораторіях, акредитованих на відповідність стандарту ДСТУ ISO / IEC 17025: 2017.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 «Метрологія, стандартизація та управління якістю» – Л.П. Клименко, Л.В. Пізінцалі, Н.І. Александровська, В.Д. Євдокимов – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011.

2 Семенец В. В. Методика підвищення якості підготовки технічних фахівців / 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.

3 Штангенциркули. Виды и устройство. Измерения и применение [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/shtangentsirkuli/>

4 Штангенциркуль [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.metalstanki.com.ua/izmeritelnyj-instrument/kak-pravilno-polzovatsja-shtangencirkulem>

5 Міжнародний стандарт ISO 3534-1, Статистика-Словник та терміни-частина 1: основні терміни статистики та можливість їх застосування – (ISO 3534-1:2006).

6 Вороничев П.П. и др. Инкрементные емкостные преобразователи перемещений. М.: Датчики и системы, 2001, №2 Измерительная техника. 2012. №8.

7 ГОСТ 166-89 (СТ СЭВ 704-77 - СТ СЭВ 707-77; СТ СЭВ 1309-78, ИСО 3599-76) Штангенциркули. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)

8 ГОСТ 8.113-85 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Штангенциркули. Методика поверки.

9 JCGM 100:2008 GUM 1995 зі змінами, оцінювання даних вимірювання – Керівництво щодо виразу невизначеності вимірювань (www.bipm.org)

10 Прохоров, А.М. Физика. Большой энциклопедический словарь [Текст] / А.М. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998 г. – 944с.

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

12 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.

13 O. Avrunin, S. Sakalo and V. Semenets, "Development of up-to-date laboratory base for microprocessor systems investigation", in 19th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo - 2009, Sevastopol, Ukraine, 2019, pp. 301-302.

14 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.

15 ISO/IEC 17025:2017 Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

16 Про метрологію та метрологічну діяльність [Текст]: [закон України: офіц. текст: станом на 11 лютого 1998 року]. – К.: Голос України, 1998. – 26 с.

17 ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація ЗВІТИ У СФЕРІ НАУКИ І ТЕХНІКИ Структура та правила оформлювання – Видання офіційне Київ ДП «УкрНДНЦ 2016.

18 ЕА - 4/02 М:2013 Вираз невизначеності вимірювання при калібруванні.

19 JCGM 200:2008 Міжнародний словник метрології – Основні та загальні концепції та терміни.

20 Міжнародний стандарт ISO 3534-1, Статистика-Словник та терміни- частина 1: основні терміни статистики та можливість їх застосування – (ISO 3534-1:2006)

21 ІЛАС Р14:12/2010 – Політика ІЛАС щодо невизначеності в калібруванні.

22 Инженер XXI века: личность и профессионал в свете гуманизации и гуманитаризации высшего технического образования / С. И. Богомолов, М. Е. Добрускин, В. В. Семенец, В. И. Штанько и др. / Под общ. ред. М. Е. Добрускина – Харьков: Рубикон, 1999. – 512 с.

23 JCGM 104:2009 Оцінка даних вимірювання – Вступ до «Настанови щодо виразу невизначеності вимірювання» та пов'язані документи.