

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Навчальний рівень магістр

Спеціальність інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

Цих В.С.

« » 20 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Комарову Марку Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Інформаційно-вимірювальні технології для визначення пошкоджень у кабельних мережах

І. Керівник роботи Піндус Н.М., к.т.н. доцент каф. ІВТЕМ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом закладу вищої освіти від від "05"12 2025 року № 752/7

Строк подання студентом роботи 2025 року

Вхідні дані до роботи: Технічний опис роботи приладу для знаходження проходження підземних кабельних мереж

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз існуючих методів виявлення пошкоджень у кабельних мережах

Розробка методики проведення вимірювань та конструкції ІВС для визначення пошкоджень у наземних та підземних кабельних мережах

Метрологічний аналіз ІВС для визначення пошкодження у наземних та підземних кабельних мережах Висновок Перелік посилань та джерел

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

МТТм – 06.00.00.001 – Прилад для пошуку пошкоджень мереж;

МТТм – 06.00.00.002 – ІВС для виявлення місця пошкодження мережі. Схема конструктивна принципова ;

МТТм – 06.00.00.003 – Схема чотирьохрівневого діагностичного дослідження істральних газопроводів

МТТм – 06.00.00.004 – Таблиця встановлення відповідності специфікації вимірювання даних досліджень;

МТТм – 06.00.00.005 – джерела похибки при визначенні пошкодження підземної кабельної мережі

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормо-контроль	Чуйко М.М., доцент каф. ІВТЕМ		
Консультант			

7. Дата видачі завдання _____ .2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примі
1.	Вступ	10.11.- 13.11.2025	
2.	1 Аналіз існуючих методів виявлення пошкоджень у кабельних мережах	14.11.- 23.11.2025	
3.	2 Розробка методики проведення вимірювань та конструкції івс для визначення пошкоджень у наземних та підземних кабельних мережах	30.11.- 09.12.2025	
4.	3 Метрологічний аналіз ІВС для визначення пошкодження у наземних та підземних кабельних мережах	10.12.- 17.12.2025	
5	Редагування пояснювальної записки	18.12- 21.12.2025	

Студент _____ Комарову М.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Піндус Н.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: «Інформаційно-вимірювальні технології для визначення пошкоджень у кабельних мережах» Комаров М.С., ІФНТУНГ, 2025, 76 с., 8 рис., 40 табл., 13 джерел

Об'єкт дослідження – металічні наземні та підземні комунікації (електричні кабельні мережі).

Мета роботи – розробити переносний універсальний прилад для знаходження місця проходження та вимірювання глибини залягання підземних та наземних кабельних мереж і одиничних електричних ліній.

В даній магістерській роботі проаналізовано основні методи і засоби для вимірювання частоти обертання. В процесі роботи було розроблено лабораторний стенд для вимірювання частоти обертання безконтактним способом. Проведено розрахунок сумарної та розширеної похибки вимірювання частоти обертання. розроблено вимірювальний блок ІВС з двома системами вимірювань. Розроблено методику проведення вимірювань яка враховує різноманітні випадки розміщення і пошкодження підземних кабельних мереж. Розроблено структурну та принципову електричні схеми приладу, а також його конструкцію. Розраховано та розроблено креслення певних конструктивних елементів приладу. Здійснено метрологічний аналіз приладу.

КАБЕЛЬНІ МЕРЕЖІ, ЕЛЕКТРИЧНІ КАБЕЛІ, МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ,
ІВС, ПОХИБКА

ABSTRACT

Master's thesis: «Information and measurement technologies for determining damage in cable networks» Komarov MS, IFNTUNG, 2025, 76 pp., 8 figures, 40 tables, 13 sources

Research object – metal surface and underground communications (electric cable networks).

The purpose of the work – is to develop a portable universal device for finding the place of passage and measuring the depth of underground and surface cable networks and single electrical lines.

In this master's thesis, the main methods and means for measuring rotation frequency are analyzed. In the process of work, a laboratory stand was developed for measuring the rotation frequency by a non-contact method. The calculation of the total and extended error of the rotation frequency measurement was carried out. a measuring unit of the IBS with two measurement systems was developed. A measurement method has been developed that takes into account various cases of placement and damage of underground cable networks. The structural and principle electrical diagrams of the device, as well as its design, have been developed. Drawings of certain structural elements of the device were calculated and developed. A metrological analysis of the device was carried out.

CABLE NETWORKS, ELECTRIC CABLES, MAGNETIC INDUCTION, IBCS, ERROR

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	6
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У НАЗЕМНИХ ТА ПІДЗЕМНИХ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	8
1.1 Загальна характеристика методів виявлення пошкоджень у наземних та підземних кабельних мереж	9
1.2 Дистанційні методи виявлення пошкоджень у підземних кабельних мережах	10
1.3 Топографічні методи виявлення пошкоджень у наземних та підземних кабельних мережах.....	13
1.4 Постановка задачі на дипломне проектування.....	22
2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА КОНСТРУКЦІЇ ІВС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У НАЗЕМНИХ ТА ПІДЗЕМНИХ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	24
2.1 Теоретичні основи створення ІВС для пошуку пошкоджень у підземних кабельних мережах.....	24
2.2 Визначення траси залягання підземної кабельної мережі.....	26
2.3 Розробка методики під'єднання генератора до досліджуваної кабельної мережі.....	29
2.3.1 Безпосереднє підключення генератора по схемі "непошкоджена жила - земля".....	29
2.3.2 Безпосереднє підключення генератора по схемі "непошкоджена жила - броня".....	30
2.3.3 Безпосереднє підключення по схемі "обірвана жила - броня".....	31
2.3.4. Безпосереднє підключення генератора між двома короткозамкнутими жилами кабельної лінії.....	32

2.3.5 Індуктивний зв'язок генератора з кабельною лінією..... 33

2.3.6 Визначення траси працюючої кабельної лінії без генератора..... 34

2.3.7 Підключення генератора до працюючої кабельної лінії через фільтр приєднання..... 35

2.4 Вибір методики визначення глибини залягання підземної кабельної мережі..... 37

2.4.1 Методики визначення глибини залягання одиничних підземних кабельних ліній..... 37

2.4.2 Особливості визначення глибини залягання при паралельному проходженні інших кабельних ліній..... 39

2.5 Методика точного визначення місцезнаходження пошкодження кабельної мережі індукційним методом..... 41

2.5.1 Точне визначення місця пошкодження кабелю після попереднього визначення зони дистанційним імпульсним методом..... 41

2.5.2 Точне визначення місця пошкодження без попереднього визначення зони..... 45

2.6 Розробка конструкції ІВС для визначення пошкодження у підземних та наземних кабельних мережах..... 46

2.6.1 Розробка структурної схеми ІВС для визначення пошкодження у наземних та підземних кабельних мережах..... 46

2.6.2 Розробка принципової електричної схеми ІВС..... 47

2.6.3 Аналіз схемотехнічних рішень електронних фільтрів для ІВС..... 49

2.7 Розробка складальних креслень корпусу ІВС та плати його блоку живлення..... 63

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ІВС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ У НАЗЕМНИХ ТА ПІДЗЕМНИХ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ..... 65

3.1 Аналіз видів похибок..... 65

3.2 Похибки розробленої вимірювальної системи ІВС..... 66

3.3 Визначення результуючої інструментальної похибки ІВС.....	72
.....	
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	79
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Частота обертання визначається як кількість повних обертів, здійснених за певний проміжок часу. Цей показник є фундаментальним для опису будь-яких періодичних процесів, що зумовлює його велику практичну цінність.

Наприклад, швидкість обертання колінчастого вала двигуна безпосередньо впливає на наповнення циліндрів, ефективність розпилення пального, аеродинаміку повітряних потоків та температурний режим камери згоряння. Тому цей параметр є визначальним для оцінки тяги двигуна та його швидкісних характеристик.

Також від цього показника залежить робота рухомих частин різноманітного обладнання. Суттєва відмінність фактичної швидкості від паспортних даних може свідчити про ризик поломки механізму. Зазвичай підвищення обертів призводить до зростання динамічного навантаження, що прискорює зношування деталей, особливо циліндро-поршневої групи. Через це моніторинг швидкості обертання є важливим елементом технічної діагностики.

Для вимірювання цього параметра застосовують тахометри. Ці прилади широко використовуються для контролю роботи двигунів внутрішнього згоряння у транспорті, турбінах та технологічних машинах. Тахометри також можуть виконувати функцію лічильників імпульсів, фіксуючи обсяги виробленої продукції, витрати матеріалів або час роботи обладнання під час випробувань. Останнім часом сфера їх використання розширилася на обслуговування систем вентиляції та кондиціонування, енергетику та металообробку [1].

Безконтактні моделі, такі як DT-2234A, DT-2234C+, AT-6, SM-8238, DT-2350 та SE-100, дозволяють оперативно вимірювати швидкість у межах від 2,5 до 99 999 обертів на хвилину на відстані від 15 до 500 мм від об'єкта.

Варто зазначити, що сучасні тахометри поєднують технологічність із простотою експлуатації. Вони оснащені великими екранами з підсвічуванням, мають високу точність, приємний дизайн та функцію пам'яті, яка зберігає мінімальні, максимальні та останні зафіксовані значення.

1 ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ

1.1 Методи та засоби вимірювання частоти обертання та ряд інших характеристик

Частота обертання характеризує рівномірний рух по колу і обчислюється як кількість повних обертів за певний проміжок часу. Для вимірювання цієї величини застосовують спеціальні прилади — тахометри. Саме частота обертання є ключовим показником, від якого залежить тяга двигуна. Такі пристрої широко використовуються для визначення швидкості обертання різних механізмів, зокрема роторів компресорів у турбореактивних двигунах, а також валів у поршневих і газотурбінних агрегатах.

1.1.1 Принцип дії тахометра

Визначення частоти обертання базується на реєстрації кількості сигналів, що надходять від датчика, вимірюванні пауз між ними, а також фіксації послідовності цих імпульсів. Тахометри також можуть виконувати функцію лічильників, що дозволяє застосовувати їх для обліку продукції на виробничих лініях, контролю використання сировини або фіксації часу роботи техніки під час випробувань.

Вимірювання може проводитися у прямому, зворотному або комбінованому напрямках. Отримані значення можна програмно адаптувати до необхідних одиниць виміру, таких як години, метри, штуки чи упаковки [2].

Аналіз швидкості обертання вала дає змогу оцінити теплові та динамічні навантаження на двигун. Оскільки тяга є функцією від швидкості обертання,

цей параметр використовують також для непрямого визначення тягового зусилля.

У системах автоматичного керування тахогенератори часто слугують датчиками зворотного зв'язку, контролюючи роботу виконавчих механізмів. Щодо точності, то для авіаційних тахометрів зі шкалою 80 мм допустима похибка за нормальних умов становить не більше $\pm 0,5\%$, тоді як для інших шкал цей показник дорівнює $\pm 1\%$.

Під час роботи прилад має створювати мінімальний рівень радіоперешкод, щоб уникнути магнітного впливу на інші вимірювальні пристрої.

Частота обертання вала пов'язана з кутовою швидкістю через відповідне математичне співвідношення.

$$\omega = 2\pi n \cdot (\text{радіан в секунду}) \quad (1.1)$$

Найчастіше тахометри є електромеханічними датчиками генераторного типу. На відміну від параметричних аналогів, таких як ємнісні, індуктивні або потенціометричні датчики, вони перетворюють механічне обертання безпосередньо в електричний сигнал.

Такі прилади, відомі як тахогенератори, активно використовуються в авіації. Вони фіксують швидкість обертання турбін реактивних двигунів (до 20 000 об/хв) та колінчастих валів поршневих агрегатів (до 4 000 об/хв). Окрім того, вони слугують елементами зворотного зв'язку в автопілотах і системах спостереження, контролюючи кутову швидкість виконавчих механізмів. У деяких випадках замість кутової вимірюється лінійна швидкість, наприклад, рух штока гідравлічного приводу.

Для створення тахометра може бути використане будь-яке фізичне явище, що дозволяє встановити чітку залежність між швидкістю обертання та іншою величиною, яку легко виміряти.

За типом чутливого елемента виділяють три основні групи тахометрів: відцентрові, що реагують на відцентрову силу неврівноважених мас; магнітоіндукційні, робота яких базується на залежності вихрових струмів від

швидкості обертання; та електричні, які генерують електрорушійну силу в магнітному полі.

Електричні моделі поділяються на пристрої змінного та постійного струму. Тахометри постійного струму класифікують за способом збудження на магнітоелектричні (з використанням постійних магнітів) та електродинамічні (з незалежною обмоткою збудження) [3].

Для визначення частоти обертання застосовують електричні, стробоскопічні та механічні методи. Серед механічних способів виділяють фрикційний, вібраційний, часовий та відцентровий, причому останні два представляють найбільший інтерес.

1.1.2 Електричні методи

Для вимірювання частоти обертання під час тестування електричних машин зазвичай застосовують три основні підходи: методи прямого перетворення, порівняння та частотний метод.

Суть методу прямого перетворення полягає у трансформації обертального руху в іншу фізичну величину, наприклад, електричний сигнал, тиск або відцентрову силу. Прилади, що працюють за цим принципом (магнітні, пневматичні, гідравлічні, відцентрові тахометри), вирізняються простотою конструкції, проте не забезпечують високого класу точності. Оскільки такі пристрої створюють додатковий гальмівний момент на валу, їх не варто використовувати для випробувань мікромашин.

Конструкція магнітного тахометра включає постійний магніт, що обертається разом із валом досліджуваного механізму, та чутливий елемент — немагнітний рухомий статор зі стрілкою та пружиною. Рух магніту індукуює в статорі струм, пропорційний швидкості обертання. Взаємодія цього струму з магнітним полем створює момент сили, який долає опір пружини та відхиляє стрілку приладу. Існують також модифікації для дистанційного вимірювання.

Магнітоелектричні системи складаються з генератора постійного струму (таходатчика), з'єднувальної лінії та вольтметра, шкала якого відображає оберти. Похибка таких пристроїв становить 1–2% через нелінійність характеристик, спричинену реакцією якоря. У випадках, коли пульсації напруги є неприпустимими, замість колекторних датчиків (із чутливістю 3–100 мВ на об/хв) використовують уніполярні генератори, хоча їхня чутливість значно нижча (близько 10 мкВ на об/хв).

Тахометри змінного струму базуються на використанні синхронних або асинхронних генераторів. Варто враховувати, що у синхронних моделях зі зміною обертів змінюється не лише напруга, а й частота струму, що вимагає коригування індуктивного опору вимірювача.

Асинхронні тахогенератори, оснащені порожнистим немагнітним ротором, забезпечують стабільність частоти напруги незалежно від її величини. Однак таким приладам властиві помітна нелінійність вихідних характеристик та значні похибки вимірювання (див. рисунок 1.1).

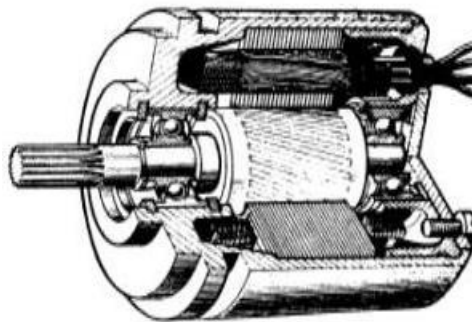


Рисунок 1.1 – Асинхронний тахогенератор з порожнистим немагнітним ротором

Гідравлічні тахометри працюють завдяки диску з системою каналів, який розміщено в герметичному резервуарі з рідиною. Під час обертання диска тиск усередині камери зростає відповідно до швидкості руху, а зміни цього тиску фіксує манометр.

Пневматичні прилади базуються на використанні відцентрового вентилятора, що обертається всередині конічного корпусу з перегородкою. Потік повітря, створюваний вентилятором, діє на спеціальну пластину з

пружиною або на манометр. Кут відхилення цієї пластини безпосередньо залежить від тиску потоку, а отже, і від кутової швидкості вентилятора.

Загальним недоліком механічних систем вимірювання (пневматичних, гідравлічних, відцентрових) є нелінійність шкали, що призводить до похибок під час градування.

Більш високу точність, порівняно з прямим перетворенням, забезпечує метод порівняння, де вимірювана частота зіставляється з еталонною. На цьому принципі працюють вібраційні, стробоскопічні та фрикційні тахометри.

Частотний метод полягає у підрахунку електричних імпульсів, що надходять від датчиків. Цей підхід дозволяє уникнути похибок, викликаних зовнішніми умовами (температурою, тиском, вологістю) або характеристиками ліній передачі при дистанційному контролі.

Важливою перевагою частотного методу є можливість збільшення частоти імпульсів за допомогою конструкції датчика без втрати точності. Це особливо корисно при роботі з низькими швидкостями обертання, де методи прямого перетворення є менш ефективними.

Для реалізації частотного методу використовують різні типи датчиків: індуктивні, індукційні, фотоелектричні та ємнісні.

Індукційні датчики поділяються на пристрої з активним та пасивним ротором. У першому варіанті ротором слугує постійний магніт, кількість полюсів якого визначає число імпульсів за оберт. У другому варіанті використовується сталевий ротор у формі зірочки, а на статорі розміщуються дві обмотки: збудження (підключена до джерела струму) та генераторна (підключена до частотоміра). Обертання ротора змінює магнітну провідність, викликаючи пульсацію потоку і виникнення електрорушійної сили з частотою, пропорційною швидкості та кількості зубців [4].

Ємнісні датчики складаються з нерухомих обкладок та диска, що обертається між ними. Диск має сектори з різною діелектричною проникністю, що під час руху змінює ємність конденсатора і викликає пульсацію струму в

ланцюзі. Частота цих пульсацій вимірюється частотоміром і залежить від швидкості обертання та кількості секторів.

Фотоелектричні датчики є безконтактними пристроями. Вони реагують на зміну освітленості фотоприймача, спричинену обертанням ротора зі світловідбивними смугами. Як приймачі використовуються фотодіоди, фототранзистори або фоторезистори. Сучасні ручні фотоелектричні тахометри вирізняються компактністю та високою точністю вимірювань.

1.1.3. Механічні методи

Серед механічних способів визначення частоти обертання виділяють фрикційний, вібраційний, часовий та відцентровий. Найбільш поширеними та важливими вважаються часовий і відцентровий методи.

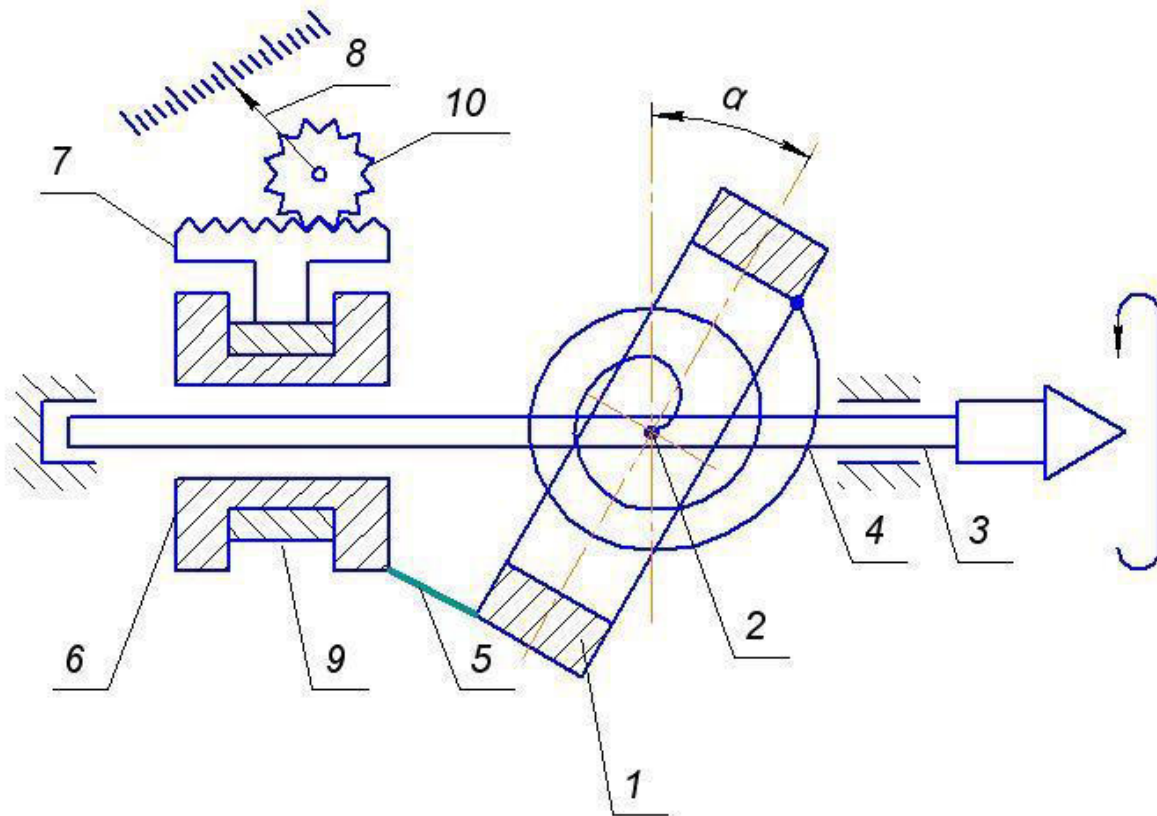
Відцентровий метод базується на фізичній закономірності, згідно з якою відцентрова сила залежить від кутової швидкості інерційної маси. У приладах, що працюють за цим принципом, вантажі закріплюються на поворотній осі за допомогою шарнірів. Під час обертання відцентрова сила змушує вантажі розходитися, що призводить до переміщення муфти вздовж осі. Цей рух стискає пружину доти, доки її пружність не врівноважить діючу силу. Описаний механізм є основою для створення чутливих елементів в авіаційних регуляторах частоти обертання газотурбінних двигунів.

Варто зазначити, що у відцентрових тахометрах, прикладом яких є маятник Уатта, реалізується квадратична залежність сили від частоти обертання [5].

Конструктивно механічні тахометри використовують відцентрові вантажі або похиле кільце, які обертаються разом із валом. Чутливим елементом виступає кільце, встановлене на осі, що проходить крізь приводний валик. Воно навантажене спіральною пружиною та з'єднане тягою з рухомою муфтою.

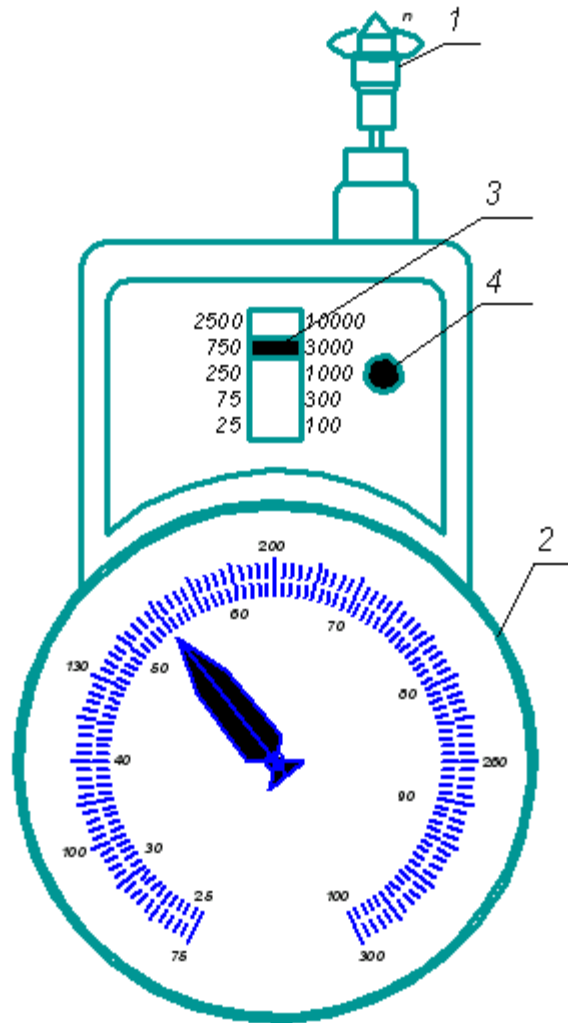
Принцип роботи полягає в наступному: під час обертання кільце прагне зайняти положення, перпендикулярне до осі обертання. Це зусилля через тягу

передається на муфту, а далі через проміжне кільце — на зубчасту рейку. Рейка взаємодіє з шестернею, на осі якої закріплена стрілка. Таким чином, механічний рух перетворюється на відхилення стрілки вздовж шкали, проградуєваної в обертах на хвилину. При цьому сам корпус приладу закріплений нерухомо, а привід здійснюється від вала двигуна.



1 чутливий елемент (кільце); 2 – вісь; 3 – приводний валик; 4 – спіральна пружина; 5 – тяга; 6 – муфта; 7 – зубчаста рейка; 8 – стрілка; 9 – проміжне кільце; 10 – шестерня.

Рисунок 1.2 - Будова механічного відцентрового стаціонарного тахометра.



1 – наконечник; 2 – корпус; 3 – покажчик; 4 - кнопка

Рисунок 1.3-Зовнішній вигляд механічного відцентрового ручного тахометра.

У сталому режимі роботи відцентрова сила, що впливає на рухоме кільце, врівноважується опором спіральної пружини, тому стрілка приладу залишається нерухомою. При зміні обертів цей баланс порушується, кільце зміщується відносно осі, що призводить до відхилення стрілки. Оскільки механічні відцентрові прилади мають нелінійну характеристику, їхня шкала є нерівномірною.

Періодичний контроль швидкості та повірку стаціонарних приладів здійснюють за допомогою ручних тахометрів. Процес вимірювання полягає у притисканні наконечника приладу до торця валу. Вбудований редуктор дозволяє змінювати передавальне відношення, забезпечуючи роботу в п'яти

діапазонах вимірювання (від 25 до 10 000 об/хв). Налаштування діапазону відбувається шляхом переміщення валу при натиснутій кнопці, а результати зчитуються за відповідною шкалою.

Відцентровим тахометрам не властиві методичні похибки, проте вони можуть мати інструментальні та динамічні похибки. Причинами їх виникнення є пружний гістерезис, температурні зміни властивостей пружини та в'язкості мастила, а також неточності виготовлення деталей.

Головними перевагами таких приладів є простота конструкції, висока точність та незалежність показів від напрямку обертання. До недоліків належать нелінійність шкали (особливо на початкових ділянках), вузький діапазон вимірювання та неможливість дистанційного контролю через обмежену довжину гнучкого вала (до 2,5 м).

Для розширення діапазону вимірювань використовують пружини зі змінною жорсткістю або механічні редуктори з ручним перемиканням швидкостей. Тому переносні моделі часто оснащують коробкою передач, що робить їх багатодіапазонними. Загалом механічні тахометри забезпечують високу точність, але не пристосовані для віддалених вимірювань [6].

Часовий метод базується на фіксації кута повороту вала за певний проміжок часу. Тахометри, що працюють за цим принципом, визначають кількість обертів за встановлений інтервал. Таким чином, цей метод дозволяє отримати значення середньої швидкості обертання, а не її миттєвий показник.

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \omega dt \quad (1.2)$$

або

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{2\pi n_{\tau}}{\tau} \quad (1.3)$$

де n_{τ} - число обертів випробуваного вала за проміжок часу τ .

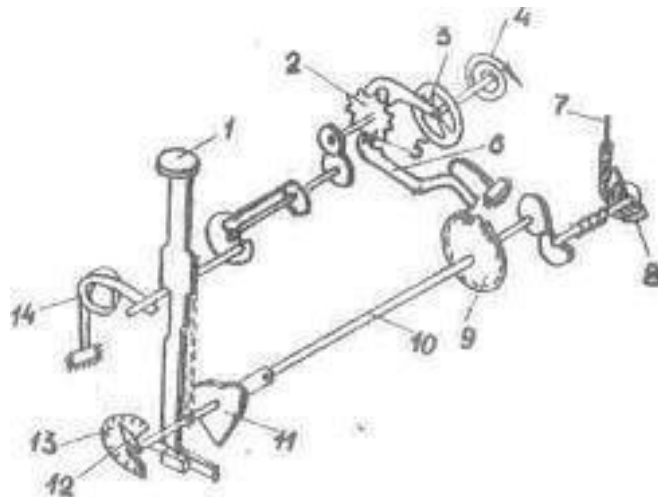
Виражаючи кутову швидкість числом обертів в хвилину, отримуємо залежність (1.4) у вигляді:

$$n_{\bar{N}D} = \frac{60 \cdot n_{\tau}}{\tau} \quad (1.4)$$

Часові тахометри, також відомі як тахоскопи або прилади вимірювання середньої швидкості, отримали свою назву завдяки вбудованому годинниковому механізму, що фіксує інтервали часу. Залежно від рівня втручання оператора ці прилади поділяють на неавтоматичні, напівавтоматичні та автоматичні.

Ручний тахоскоп конструктивно поєднує лічильник обертів, секундомір зі шкалою на 60 секунд, а також механізми запуску та обнулення. Процес вимірювання виглядає так: оператор з'єднує валик приладу з валом, що тестується, і натискає кнопку, одночасно запускаючи відлік часу та обертів. Через хвилину він зупиняє механізм, а отримане значення відповідає середній швидкості обертання (об/хв) за цей проміжок часу.

Напівавтоматичні моделі вдосконалені тим, що вимикання лічильника відбувається самостійно після завершення фіксованого інтервалу часу. Оператору залишається лише вручну запустити вимірювання та скинути показники на нуль перед наступним циклом. Шкала таких приладів зазвичай одразу проградуєрована в обертах на хвилину. Схема напівавтоматичного тахометра моделі 9ЧП представлена на рисунку 1.4.



1 – пусковий важіль; 2- спускове колесо; 3 – спускове колесо; 4 – спіраль; 5 – палець спускового колеса; 6 – собачка; 7 – приводний валик; 8 – фрикційна

муфта; 9 – колесо; 10 – вісь; 11 – кулачок; 12 – стрілка; 13 – циферблат; 14 – пружина.

Рисунок.1.4 - Схема напівавтоматичного часового тахометра типу 9ЧП

Пуск механізму проводиться натисненням на кнопку пускового важеля 1. При натисканні заводиться пружина 14 часового механізму. Одночасно пусковий важіль повертає кулачок 11 який розміщений фрикційно на центральній осі 10, повертаючи стрілку 12 на нульову позначку циферблата 13. Після опускання кнопки стрілка і центральна вісь залишаються застопорені собачкою 6, зчепленою з колесом 9, яке нерухомо сидить на центральній осі. Приводний валик 7 приєднується до випробувального валу перед пуском тахометра: він може обертатися завдяки прослизанню у фрикційній муфті 8. Заведена пружина 14 приводить в дію часовий механізм, спускове колесо 2 починає обертатися, палець 5 спускового колеса натискає на собачку 6, звільняючи колесо 9 і вісь 10. Стрілка починає обертатися. Після закінчення певного часу (зазвичай 3 або 6с.) Палець 5 звільняє собачку 6, яка стопорить колесо 9 і вісь 10. Стрілка зупиняється і за шкалою можна зробити відлік вимірюваної кутової швидкості. Після вимірювання прилад відключають від випробуваного валу. Характеристика цього тахометра має вигляд:

$$a = i \cdot \tau \cdot \omega \quad (1.5)$$

або

$$a = \frac{\pi}{30} i \cdot \tau \cdot n \quad (1.6)$$

де a - кут повороту стрілки лічильника в радіанах;

i - передавальне відношення передачі між віссю стрілки і приводним валиком тахометра;

τ - час роботи лічильника в с.

Відносна приведена похибка тахометрів цього типу не повинна перевищувати $\pm 1\%$ при установці приладу в нормальному положенні (шкала

горизонтальна, приводний вал і перевіряються співвісні) і при температурі в межах 20 ± 5 ° С.

Для безперервного контролю кутової швидкості використовують автоматичні часові тахометри. У цих пристроях лічильник періодично активується та зупиняється спеціальним механізмом, який отримує рух від приводного валика через фрикційну передачу. Важливою особливістю є те, що стрілка приладу не повертається до нуля після кожного циклу, а утримує останнє значення до моменту отримання нових даних [7].

Фрикційний метод ґрунтується на принципі самовирівнювання ролика, що контактує з конусом, який обертається зі стабільною швидкістю. Вимірювання відбувається шляхом порівняння досліджуваної швидкості з еталонною завдяки зміні передавального відношення варіатора. Точність таких приладів залежить від стабільності роботи еталонного двигуна, а похибка зазвичай становить не більше 0,5%.

Стробоскопічний метод базується на оптичній ілюзії, коли обертовий об'єкт здається нерухомим, якщо його освітлювати короткими спалахами з частотою, синхронною до частоти обертання. Цей ефект можливий завдяки інерційності людського зору, здатного утримувати зображення протягом 1/15–1/20 секунди.

Робота строботахометра полягає в налаштуванні частоти світлових імпульсів. Коли частота спалахів збігається зі швидкістю обертання деталі, вона візуально «завмирає». Якщо частоти різняться, виникає ефект повільного руху: деталь ніби обертається в реальному напрямку (якщо частота спалахів менша) або у зворотному (якщо частота спалахів більша). Результат вимірювання зчитується зі шкали регулятора. Такі прилади забезпечують високу точність у діапазоні від 1000 до 50 000 обертів на хвилину.

Також для вимірювань застосовують фотодатчики, що складаються з джерела світла, фотоприймача та диска з отворами (або дзеркальної мітки на валу). Під час обертання світло потрапляє на приймач імпульсами, частота яких

відповідає швидкості обертання. Ці сигнали обробляє електронний частотомір, який і видає кінцевий результат.

2 БУДОВА ТА РОБОТА РОЗРОБЛЕНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ

Створений лабораторний комплекс включає спеціальний стенд та фото тахометра моделі SE-100. Під час проектування особливий акцент було зроблено на забезпечення якості та надійності обладнання, оскільки воно призначене для використання у навчальному процесі. Окремо слід відзначити зручність цієї установки, яка вирізняється простотою як в експлуатації, так і в технічному обслуговуванні.

2.1 Будова та принцип дії лабораторної установки

Головним призначенням цієї лабораторної установки є проведення експериментів із вимірювання частоти обертання за допомогою оптичного тахометра, а також вивчення впливу різноманітних зовнішніх факторів на точність отриманих даних.

Для зміни швидкості обертання вала в електричну схему стенда включено змінний резистор, з'єднаний послідовно з двигуном. Це дозволяє плавно регулювати оберти під час дослідів. Перед початком роботи на вал встановлюють спеціальний диск — білий або чорний — із нанесеними контрастними радіальними мітками.

Комплект обладнання містить вісім дисків: чотири білого та чотири чорного кольору. На них нанесено різну кількість маркерів (від одного до чотирьох), що дає змогу отримувати відмінні покази приладу навіть при незмінній фактичній швидкості вала двигуна. Вимірювання виконують послідовно для кожного диска, при цьому лазерний промінь тахометра необхідно фокусувати безпосередньо на смужці маркера, що обертається.

Конструктивно стенд виконано у вигляді закритого дерев'яного корпусу. Всередині розміщено двигун постійного струму, схему керування та джерело

живлення. Живлення системи здійснюється напругою 3 В, що забезпечується акумулятором або двома батарейками типу АА.

Органи керування, зокрема вимикач і регулятор обертів, винесені на бічну панель, тоді як на лицьовій частині розташовано сам обертовий диск. Розташування тумблерів продумано таким чином, щоб гарантувати безпеку експлуатації та уникнути їх перегрівання.

2.2 Будова, структурна схема та принцип дії тахометра «SE-100 »

При розробці лабораторного стенду використовувався тахометр SE-100, оскільки він досить простий у використанні, відносно недорогий.

2.2.1 Основні технічні характеристики тахометра SE-100

Оптичний тахометр моделі SE-100 (фото тахометр) класифікується як переносний прилад. Це одноканальний пристрій, що працює у двох вимірювальних діапазонах і формує дискретний вихідний сигнал. Для відображення отриманих даних використовується цифрове табло на основі світлодіодних індикаторів [8].

Детальні технічні характеристики, зокрема межі вимірювання частоти обертання, допустима похибка, робоча дистанція, час стабілізації показів та тип приймача випромінювання, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1- Характеристики тахометра SE-100

Умовне позначення типу і виконання	Діапазон вимірюваних частоти обертання, об/хв		Границя допустимої основної похибки	Робоча відстань, мм		Час встановлення показів, с	Тип приймача випромінювання
	від	до		Від	до		
SE - 100	60	50000	± 1 об/хв	15	150	1	Фотодіод

Для живлення приладу використовують три батареї типу SUM-3 (R6). Такий комплект батарей забезпечує автономність роботи протягом 9 годин у режимі безперервних вимірювань. При звичайній експлуатації термін служби елементів живлення становить близько 36 годин.

Загальний вигляд тахометра наведено на рисунку 2.1.

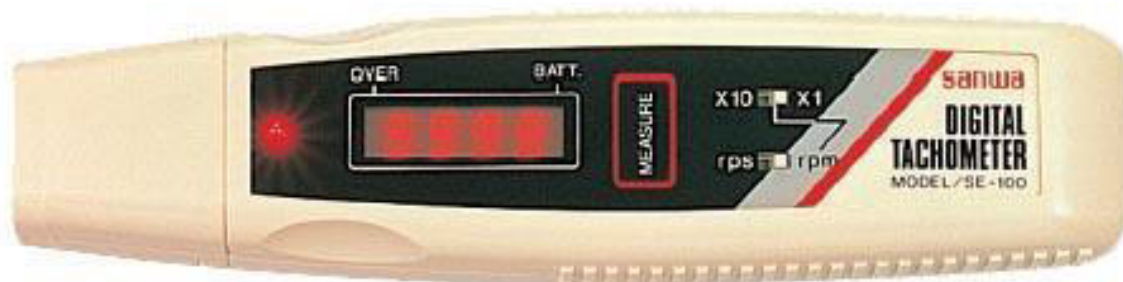


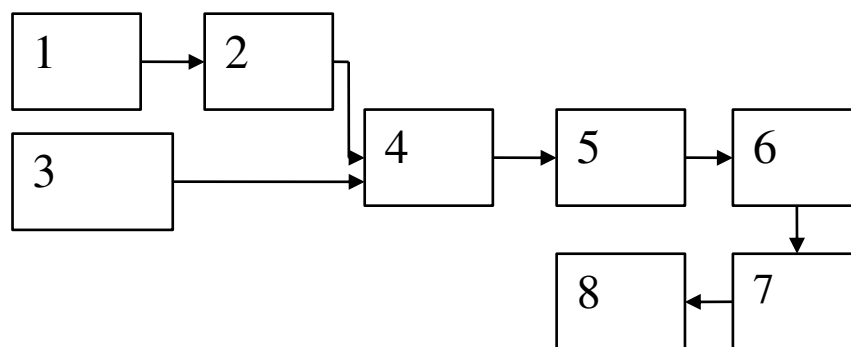
Рисунок 2.1 – загальний вигляд тахометра SE-100

2.2.2 Будова та робота тахометрів

Робота тахометра базується на обробці сигналів від датчика: пристрій реєструє кількість імпульсів, вимірює паузи між ними та визначає послідовність їх надходження. Завдяки цьому він не лише вимірює швидкість обертання, а й може слугувати лічильником. Це дозволяє використовувати його для обліку продукції на виробничих лініях, контролю витрат матеріалів чи фіксації часу роботи техніки під час обкатки.

Вимірювальний процес може проходити у прямому, зворотному або двосторонньому режимах. Важливою особливістю є можливість програмного налаштування масштабування, що дозволяє одразу отримувати результати у зручних одиницях виміру, таких як метри, штуки, години чи хвилини.

Структурна схема фототахометра наведена на рисунку 2.2.

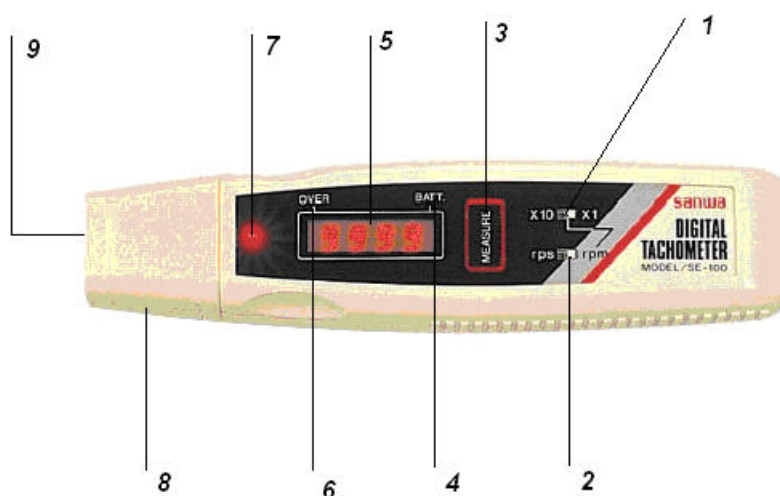


1 - операційний підсилювач (ОП); 2- формувач імпульсів (ФІ); 3 - генератора імпульсів (ГІ); 4- - часовий селектор (ТС); 5 - лічильник (ЛЧ); 6 - реєстр (РГ); 7 - дешифратор (ДШ); 8 - цифровий індикатор (ЦІ).

Рисунок 2.2 Структурна схема тахометра

Тахометр складається з операційного підсилювача (ОП), формувача імпульсів (ФІ), часового селектора (ТС), лічильника (ЛЧ), реєстра (РГ), дешифратора (ДШ), цифрового індикатора (ЦІ) та генератора імпульсів (ГІ).

Будова тахометра зображена на рисунку 2.3



1 - перемикач діапазону вимірювання; 2 – перемикач режиму вимірювання; 3 – перемикач вимірювання; 4 – світло діод сигналізації розрядження батареї; 5 – дисплей; 6 – світлодіод індикації перевищення діапазона вимірювання; 7 – світлодіод підтвердження визначення; 8 – первинний перетворювач; 9 – лінза.

Рисунок 2.3 – будова тахометра SE-100

2.2.3 Підготовка тахометра до роботи виконання вимірювань

Після розпакування пристрою необхідно провести його візуальний огляд та пересвідчитися, що індикатор низького заряду не активний. Перед початком експлуатації обов'язково перевірте справність елементів живлення.

З міркувань безпеки, незважаючи на технічні можливості приладу, не слід проводити вимірювання на надто малій відстані від рухомих механізмів. Оскільки принцип роботи тахометра базується на фотоелектричному методі, на обертову деталь необхідно нанести спеціальну світловідбивну мітку. Поверхню перед наклеюванням слід ретельно очистити від бруду, вологи чи мастила. Якщо поверхня валу дзеркальна або полірована, її попередньо матують чорною фарбою або стрічкою, щоб уникнути паразитного відбиття світла.

Під час роботи слідкуйте, щоб на датчик не потрапляло стороннє пульсуюче світло, наприклад, від люмінесцентних ламп. Для перевірки відсутності перешкод увімкніть прилад при нерухомому об'єкті або в темряві — покази мають дорівнювати нулю. Якщо вимірювана величина перевищує значення 9999, на дисплеї з'явиться відповідний сигнал переповнення діапазону (наприклад, миготіння).

Оберегайте лінзу від механічних пошкоджень, а при забрудненні обережно очищуйте її м'якою серветкою. Умови зберігання приладу виключають місця з сильною вібрацією, високою вологістю, екстремальними температурами або прямим сонячним випромінюванням [9].

Для вимірювання частоти обертання у хвилинах (режим rpm) необхідно встановити перемикач у відповідне положення та обрати діапазон. Натиснувши

кнопку вимірювання, активується червоний промінь, який слід направити на світловідбивну смужку з відстані 10–150 мм. Стабільне миготіння індикатора свідчить про коректне зчитування. Отриманий результат на дисплеї слід помножити на коефіцієнт обраного діапазону ($\times 1$ або $\times 10$). Після відпускання кнопки останнє значення фіксується на екрані протягом 10 секунд, після чого прилад автоматично вимикається. Повторне натискання кнопки скидає попередній результат і розпочинає новий замір.

Вимірювання обертів за секунду (режим *grs*) виконується аналогічно, але перемикач режимів переводиться в позицію *grs*. У цьому випадку результат на дисплеї відповідає реальному значенню і не потребує додаткового перерахунку.

Для заміни або встановлення елементів живлення зніміть кришку батарейного відсіку на задній панелі, натиснувши на фіксатор. Вставте чотири батарейки типу AA (SUM-3, R6), дотримуючись полярності (зручніше починати з внутрішніх елементів). Якщо на дисплеї з'явився індикатор розряду або прилад не вмикається, комплект батарей слід замінити на новий.

Використання даного лабораторного стенду дозволяє студентам на практиці засвоїти принципи роботи оптичного тахометра та набути навичок безконтактного вимірювання кутової швидкості.

2.3.1 Вимірювання частоти обертання за допомогою тахометра

Мета цієї лабораторної роботи полягає в опануванні будови та правил експлуатації тахометра SE-100. Головним завданням є набуття практичних навичок роботи з приладом для точного вимірювання частоти обертання та визначення похибки отриманих результатів.

Для успішного виконання завдання на лабораторному стенді необхідно дотримуватися чіткої послідовності дій. Насамперед, запуск обладнання здійснюється виключно під контролем викладача або лаборанта. Під час увімкнення слід уважно розглянути конструкцію установки та зрозуміти

принцип її роботи. Далі необхідно розпакувати вимірювальний прилад, вивчити його будову та детально ознайомитися з інструкцією користувача.

Рекомендований формат роботи — у парах. Це дозволяє ефективно розподілити обов'язки: один студент проводить вимірювання, а інший фіксує результати у заздалегідь підготовленій таблиці 3.1. Через певний час учасники повинні помінятися ролями для повного засвоєння матеріалу.

Процес вимірювання розпочинається з увімкнення тахометра та активації лазерного цілевказівника для точного наведення. Прилад слід тримати під прямим кутом до стенда на відстані 15–150 мм від об'єкта, при цьому промінь має потрапляти чітко в центр маркерної смужки, що обертається. Якщо важко утримувати пристрій нерухомо в руках, доцільно скористатися настільним штативом.

Експериментальна частина починається з використання білого диска з однією чорною смужкою. Необхідно виміряти частоту обертання на різних швидкостях, кількість яких визначає викладач. Потім послідовно збільшують кількість чорних смужок від однієї до чотирьох, повторюючи вимірювання. Після цього переходять до роботи з чорним диском, на який нанесені білі маркери, і проводять аналогічні заміри, змінюючи кількість міток від однієї до чотирьох.

Після завершення серії вимірювань слід вимкнути лазер і сам прилад та передати його наступній групі студентів. По закінченні заняття тахометр необхідно належним чином упакувати, а лабораторний стенд знеструмити, суворо дотримуючись правил експлуатації та інструкцій безпеки [10].

Таблиця 2.2 Результати вимірювання частоти обертання диска на лабораторному стенді (зразок таблиці).

№ п/п	Швидкість	Частота обертання диска з однією смужкою	Частота обертання диска з двома смужками	Частота обертання диска з трьома смужками	Частота обертання диска з чотирьма смужками
1.	1.				
2.	2.				
3.	3.				
4.	4.				
5.	5.				
6.	5.				
7.	4.				
8.	3.				
9.	2.				
10.	1.				

Всі вимірювання та розрахунки записуються в кінцеву таблицю (див. таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Зразок таблиці для розрахунків частоти обертання

№ п/п	Швидкість	Частота обертання диска з однією смужкою	Частота обертання диска з двома смужками	Частота обертання диска з трьома смужками	Частота обертання диска з чотирьма смужками
1.	1.				
2.	2.				
3.	3.				
4.	4.				
5.	5.				
6.	5.				
7.	4.				
8.	3.				
9.	2.				
10.	1.				
X _{сер.} , об/хв					
Δ					
δ, %					

В цій таблиці записуються всі результати вимірювання частоти обертання, в даному варіанті показано тільки десятиразове вимірювання частоти обертання. В залежності від завдань, можна збільшити або зменшити кількість вимірювань.

Після виконання вимірювань потрібно обробити отримані значення та зробити з них правильні висновки. Для початку знаходимо середнє значення частоти обертання для кожного диска з кількістю смужок від однієї до чотирьох, яке визначається за формулою:

$$t_{сер} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{10} t_i$$

$$t_{сер.} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^5 t_i \quad (2.1)$$

де t_i – значення виміряної частоти обертання;

$t_{сер.}$ – середнє значення частоти обертання;

N – кількість вимірювань.

Після визначення середнього значення частоти обертання, визначаємо абсолютну та відносну похибку для кожного значення частоти обертання.

Абсолютна похибка – це абсолютна різниця між результатом вимірювання та умовно істинним значенням вимірюваної величини. Розмірність абсолютної похибки є такою ж, як і у вимірюваної величини. Є ознакою якості вимірювання величини і величина похибки залежить від умов проведення вимірювання: засобу вимірювання, умов вимірювання тощо [5]. Визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{I}{N} \sum_{i=1}^{10} |t_i - t_{\text{сер}}| \quad (2.2)$$

де Δ – значення абсолютної похибки;

t_i – значення вимірюваної частоти обертання;

$t_{\text{сер}}$ – середнє значення частоти обертання;

N – кількість вимірювань.

Після отриманого значення абсолютної похибки можемо знаходити відносну похибку. Відносна похибка вимірювання – це похибка вимірювання, виражена як відношення абсолютної похибки до дійсного чи вимірюваного значення. Відносну похибку у долях вимірюваної величини або в процентах знаходять із співвідношень:

$$\delta = \frac{\Delta}{t_{\text{сер}}} \quad (2.3)$$

або

$$\delta = \frac{\Delta}{t_{\text{сер}}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

2.3.2 Практичне вимірювання частоти обертання та обробка результатів вимірювання за допомогою тахометра.

Згідно поданих вище вказівок вимірюємо частоту обертання білого диска з чорними смужками від однієї до чотирьох. Вимірювання здійснюємо по порядку від однієї смужки до чотирьох. Всі результати вимірювання записуємо в таблицю 2.4

Таблиця 2.4 Результати вимірювання частоти обертання на лабораторному стенді білого диска з чорними смужками.

№ п/п	Швидкість	Частота обертання білого диска з однією чорною смужкою	Частота обертання білого диска з двома чорними смужками	Частота обертання білого диска з трьома чорними смужками	Частота обертання білого диска з чотирма чорними смужками
1.	1.	1729	3333	4811	6159
2.	2.	2059	3781	5339	6758
3.	3.	2060	3789	5361	6795
4.	4.	2069	3795	5363	6799
5.	5.	2072	3799	5365	6803
6.	5.	2073	3798	5365	6801
7.	4.	2065	3795	5363	6790
8.	3.	2061	3786	5359	6788
9.	2.	2048	3778	5335	6756
10.	1.	1726	3321	4819	6170

При кожному вимірюванні завжди присутня певна похибка, яку ми визначаємо за поданими вище формулами і записуємо в таблицю 2.5

Таблиця 2.5 – Розрахунок похибок вимірювання

№ п/п	Швидкість	Частота обертання білого диска з однією чорною смужкою	Частота обертання білого диска з двома чорними смужками	Частота обертання білого диска з трьома чорними смужками	Частота обертання білого диска з чотирьма чорними смужками
1.	1.	1729	3333	4811	6159
2.	2.	2059	3781	5339	6758
3.	3.	2060	3789	5361	6795
4.	4.	2069	3795	5363	6799
5.	5.	2072	3799	5365	6803
6.	5.	2073	3798	5365	6801
7.	4.	2065	3795	5363	6790
8.	3.	2061	3786	5359	6788
9.	2.	2048	3778	5335	6756
10.	1.	1726	3321	4819	6170
$\bar{X}_{сер}, об/хв$		1996.2	3697.5	5308	6661.9
Δ		107.48	148.2	137.2	198.96
$\delta, \%$		5.38	4	2.58	2.99

Із таблиці 2.5 можемо записати результати вимірювання:

1) швидкість обертання білого диска з однією чорною смужкою:

$$\omega = (1996,2 \pm 107,48) \text{ об/хв}$$

2) швидкість обертання білого диска з двома чорними смужками:

$$\omega = (3697.5 \pm 148,2) \text{ об/хв}$$

3) швидкість обертання білого диска з трьома чорними смужками

$$\omega = (5308 \pm 137,2) \text{ об/хв}$$

4) швидкість обертання білого диска з чотирьма чорними смужками:

$$\omega = (6661.9 \pm 198,96) \text{ об/хв}$$

Згідно поданих вище вказівок вимірюємо частоту обертання чорного диска з білими смужками від однієї до чотирьох. Вимірювання здійснюємо по порядку від однієї смужки до чотирьох. Всі результати вимірювання записуємо в таблицю 2.6

Таблиця 2.6 Результати вимірювання частоти обертання на лабораторному стенді чорного диска з білими смужками.

№ п/п	Швидкість	Частота обертання чорного диска з однією білою смужкою	Частота обертання чорного диска з двома білими смужками	Частота обертання чорного диска з трьома білими смужками	Частота обертання чорного диска з чотирма білими смужками
1.	1.	1608	3083	4485	5728
2.	2.	1710	3134	4555	4847
3.	3.	1714	3227	4584	5984
4.	4.	1717	3242	4597	6077
5.	5.	1726	3245	4602	6086
6.	5.	1723	3243	4601	6085
7.	4.	1716	3240	4595	6070
8.	3.	1712	3225	4582	5980
9.	2.	1708	3131	4550	5836
10.	1.	1605	3080	4480	5726

При кожному вимірюванні завжди присутня певна похибка, яку ми визначаємо за поданими вище формулами і записуємо в таблицю 2.7

Таблиця 2.7 – Розрахунок похибок вимірювання

№ п/п	Швидкість	Частота обертання чорного диска з однією білою смужкою	Частота обертання чорного диска з двома білими смужками	Частота обертання чорного диска з трьома білими смужками	Частота обертання чорного диска з чотирьма білими смужками
1.	1.	1608	3083	4485	5728
2.	2.	1710	3134	4555	4847
3.	3.	1714	3227	4584	5984
4.	4.	1717	3242	4597	6077
5.	5.	1726	3245	4602	6086
6.	5.	1723	3243	4601	6085
7.	4.	1716	3240	4595	6070
8.	3.	1712	3225	4582	5980
9.	2.	1708	3131	4550	5836
10.	1.	1605	3080	4480	5726
X _{сер.} , об/хв		1693.9	3185	4563.1	5941.9
Δ		34.96	62.4	36.48	126.12
δ, %		2.06	1.96	0.8	2.12

Із таблиці 2.7 можемо записати результати вимірювання:

1) швидкість обертання чорного диска з однією білою смужкою:

$$\omega = (1996,2 \pm 107,48) \text{ об/хв}$$

2) швидкість обертання чорного диска з двома білими смужками:

$$\omega = (3697.5 \pm 148,2) \text{ об/хв}$$

3) швидкість обертання чорного диска з трьома білими смужками:

$$\omega = (5308 \pm 137,2) \text{ об/хв}$$

4) швидкість обертання чорного диска з чотирьма білими смужками:

$$\omega = (6661.9 \pm 198,96) \text{ об/хв}$$

На наступному етапі кожна бригада переходить до виконання експериментальної частини. Залежно від вказівок викладача, завдання полягає у дослідженні впливу на покази тахометра або відстані до об'єкта, або кута падіння лазерного променя. Випробування проводяться з використанням

повного набору дисків: як білих із чорними маркерами, так і чорних із білими (кількість смужок варіюється від однієї до чотирьох).

При дослідженні залежності від відстані вимірювання виконують, змінюючи дистанцію між приладом і стендом у межах від 15 до 60 мм за незмінної швидкості обертання. Якщо досліджується вплив кута огляду, заміри проводять, змінюючи нахил тахометра в діапазоні 90–99 градусів. Усі отримані експериментальні дані необхідно занести до таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Зразок таблиці результатів вимірювання частоти обертання

№ п/п	Відстань, мм або кут спостереження	Частота обертання диска з однією смужкою	Частота обертання диска з двома смужками	Частота обертання диска з трьома смужками	Частота обертання диска з чотирьма смужками
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Після здійснення вимірювання розраховуємо різницю між частотами обертання та шукаємо їх середнє значення (Δ та Δ_c). Далі від кожної Δ віднімаємо Δ_c та підносим до квадрату. Результати обчислень записуємо в таблицю 2.9.

3. МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ТАХОМЕТРА «SE-100» ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

3.1 Загальна інформація про теорію невизначеності

Для коректного порівняння результатів вимірювань необхідно кількісно оцінювати їхню точність. У сучасній міжнародній практиці (стандарти ISO) для цього використовують поняття невизначеності, яке поступово витісняє традиційну концепцію похибки. Суть підходу полягає в тому, що навіть після врахування всіх відомих похибок та внесення поправок залишається сумнів, наскільки отриманий результат відповідає істинному значенню величини.

Будь-яке вимірювання супроводжується похибками, які прийнято поділяти на випадкові та систематичні. Випадкова складова виникає через непередбачувані зміни умов і не може бути повністю компенсована, хоча її вплив зменшується при збільшенні кількості спостережень. Систематична складова зумовлена постійними факторами; її можна частково усунути введенням поправок, проте через неможливість ідеального визначення цих поправок завжди залишається невиключений залишок систематичної похибки.

Саме тому результат вимірювання, навіть після корекції, залишається оцінкою, що містить невизначеність. Згідно з ДСТУ та ISO, невизначеність — це параметр, що характеризує розсіювання значень, які обґрунтовано можуть бути приписані вимірюваній величині. Це поняття відображає той факт, що існує не одне, а безліч значень, сумісних із результатами спостережень.

До основних джерел невизначеності належать: нечітке визначення вимірюваної величини, недосконалість методу або процедури вимірювання, нерепрезентативність вибірки, вплив навколишнього середовища, похибки зчитування аналогових приладів, обмежена роздільна здатність обладнання, неточність довідкових констант та розкид результатів при повторних замірах.

Методи оцінювання невизначеності поділяють на два типи:

- Тип А: розрахунок здійснюється шляхом статистичного аналізу серії

повторних вимірювань.

- Тип В: оцінювання проводиться іншими методами, відмінними від статистичного аналізу рядів спостережень (наприклад, на основі паспортних даних приладів або попереднього досвіду).

Важливо розрізняти природу похибок і методи оцінювання невизначеності. Поділ на випадкові та систематичні похибки стосується причин їх виникнення, тоді як поділ на типи А і В стосується способу розрахунку. Не існує прямої відповідності між випадковими похибками й типом А або систематичними й типом В. Обидва методи базуються на ймовірнісних розподілах і використовують середньоквадратичне відхилення або дисперсію для кількісної оцінки [11].

Компоненти, оцінені за методом типу А, характеризуються оцінкою дисперсії, яку отримують шляхом серії повторних вимірювань та їх статистичного аналізу. Оцінку середньоквадратичного відхилення $U=S$ у цьому випадку називають стандартною невизначеністю типу А.

Для складових, визначених за методом типу В, оцінку невизначеності здійснюють на основі наявних знань, а відповідне відхилення називають стандартною невизначеністю типу В.

Таким чином, стандартна невизначеність — це невизначеність результату, подана у вигляді стандартного відхилення. Якщо результат формується на основі кількох інших величин, його невизначеність називають сумарною (або комбінованою) стандартною невизначеністю.

Розширену невизначеність U обчислюють шляхом множення стандартної невизначеності на коефіцієнт покриття K . Метою введення параметра U є визначення інтервалу навколо результату вимірювання, який охоплює більшу частину розподілу значень величини. Вибір коефіцієнта K залежить від бажаного рівня довіри.

У більшості випадків найкращою оцінкою істинного значення величини q , для якої за однакових умов отримано n незалежних результатів, є середнє арифметичне.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (3.1)$$

Експериментальну дисперсію спостережень, яка є статичною оцінкою дисперсії $\sigma^2(q)$ розподілу імовірностей величини q , отримують як :

$$S^2(q_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \quad (3.2)$$

Додатній квадратний корінь $S(q_i)$ із дисперсії називають експериментальним середньоквадратичним відхиленням.

Найкращою оцінкою дисперсії середнього значення є:

$$S^2(\bar{q}) = \frac{S^2(q_i)}{n} \quad (3.3)$$

Відповідне середньоквадратичне відхилення середнього значення :

$$S(\bar{q}) = \frac{S(q_i)}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

Таким чином, стандартною невизначеністю, оціненою за типом А, для результату вимірювання , за який приймається середнє значення є:

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n(n-1)}} \quad (3.5)$$

За наявності безлімітного часу та ресурсів лабораторія могла б застосувати статистичний аналіз рядів спостережень (оцінювання за типом А) для дослідження кожного джерела похибки. Однак у реальних умовах це неможливо, тому частину складових оцінюють інакше — за методом типу В.

Оцінювання за типом В базується на фаховому судженні про варіативність величини з урахуванням усієї доступної інформації. Дані для цього беруть із результатів попередніх вимірювань, загальних знань про властивості матеріалів, технічних специфікацій виробника, свідоцтв про

півірку чи калібрування, а також із довідників.

У випадках, коли неможливо виконати аналіз повторних спостережень, застосовують апіорний розподіл ймовірностей. Він відображає ступінь впевненості у настанні події, спираючись на наявні, хоч і обмежені, знання.

Якщо відомі лише верхня та нижня межі можливих значень, а інформація про характер розподілу всередині інтервалу відсутня, використовують припущення про рівномірний розподіл. Це означає, що ймовірність отримання будь-якого значення в межах діапазону вважається однаковою, а очікуваним значенням є середина цього інтервалу, для якої й розраховують дисперсію.

$$U^2(q) = \frac{(a^+ - a^-)^2}{12} \quad (3.6)$$

або середньоквадратичним відхиленням:

$$U(q) = \frac{a^+ - a^-}{2\sqrt{3}} \quad (3.7)$$

Рівномірний розподіл не слід застосовувати, якщо відомо, що ймовірність появи значень біля меж інтервалу є нижчою, ніж у його центрі. У таких ситуаціях, опираючись на центральну граничну теорему, часто роблять припущення про наближення розподілу до нормального. Для нормального закону інтервал $\mu_q \pm 3\sigma(q)$ охоплює близько 99,73% розподілу. За цих умов прийнято вважати:

$$U^2(q) = \frac{(a^+ - a^-)^2}{36} \quad (3.8)$$

або

$$U(q) = \frac{(a^+ - a^-)^2}{6} \quad (3.9)$$

Однак, якщо впевненості в нормальності розподілу немає, то доцільно прийняти компроміс між рівномірним та нормальним розподілом, допускаючи, наприклад, розподіл Сімпсона (трикутний). Тоді:

$$U^2(q) = \frac{(a^+ - a^-)^2}{24} \quad (3.10)$$

або

$$U(q) = \frac{(a^+ - a^-)^2}{2\sqrt{6}} \quad (3.11)$$

Сумарна стандартна невизначеність — це невизначеність результату вимірювання, який визначається на основі значень кількох інших величин. Математично вона являє собою квадратний корінь із суми компонентів (дисперсій або коваріацій цих величин), зважених залежно від того, як зміни входних даних впливають на кінцевий результат.

Сумарна стандартна невизначеність $U_c(y)$ також є оцінкою середньоквадратичного відхилення і відображає розсіяння значень, які з достатнім обґрунтуванням можуть бути віднесені до вимірюваної величини. Її значення визначається за формулою:

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^N U^2(X_i) \quad (3.12)$$

або

$$U_c(y) = \sum_{i=1}^N \sqrt{U^2(X_i)} \quad (3.13)$$

Отже, стандартна невизначеність зазвичай характеризує прямі вимірювання, тоді як сумарна стосується опосередкованих вимірювань. Водночас, якщо під час прямого вимірювання на результат впливають кілька джерел похибок, його стандартна невизначеність також може розглядатися як сумарна.

Розширена невизначеність U визначає межі інтервалу навколо отриманого результату. Очікується, що саме в цей діапазон потрапляє більшість значень, які можуть бути обґрунтовано віднесені до вимірюваної величини [12].

Число P , яке відображає частку розподілу значень у межах цього інтервалу, називають ймовірністю охоплення або рівнем довіри.

Розширену ймовірність розраховують за формулою:

$$U = k \cdot U_c \quad (3.14)$$

де k - числовий коефіцієнт, що використовується як множник сумарної

стандартної невизначеності для отримання розширеної. Його називають коефіцієнтом покриття або коефіцієнтом охоплення.

Коли розширена невизначеність вже обчислена, результат вимірювання зазвичай подають у вигляді $Y = y \pm U$. Такий запис вказує на те, що величина y є найкращою оцінкою вимірюваного параметра Y . При цьому діапазон від $y-U$ до $y+U$ охоплює значну частину розподілу ймовірностей (P), що містить значення, які можна обґрунтовано віднести до вимірюваної величини.

Вибір коефіцієнта покриття k залежить від необхідного рівня довіри. Однак зв'язок між цим інтервалом та рівнем довіри ґрунтується на певних припущеннях щодо характеру розподілу ймовірностей. Точність визначення рівня довіри прямо залежить від того, наскільки ці припущення відповідають дійсності. Тому на практиці розрахунок інтервалу для заданого рівня довіри зазвичай є наближеним.

3.2. Розрахунок невизначеності вимірювання частоти тахометром SE – 100 від впливу стороннього тіла

Оскільки для вимірювання частоти обертання фототахометром необхідна наявність прямої видимості між об'єктом вимірювання і вимірювальним приладом, наявність завади на шляху світлових променів призводить до невизначеності результату вимірювання.

Завада у вигляді непрозорого тіла робить вимірювання неможливим, тому в даному випадку розглядається вплив перешкод які зменшують оптичну проникність середовища, наприклад дим, туман, тощо.

В якості завади при дослідженні використовувалася плоска скляна пластина розташована між об'єктом вимірювання (стенду) і тахометром.

Було проведено ряд вимірювання частоти обертання чорного диска з білими маркерами на різних швидкостях обертання при відсутності і наявності завад. Експериментальні дані наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 Покази частоти обертання чорного диска з 4 білими смужками без скла і через скло.

Значення частоти обертання чорного диска з 4 смужками	5728	5847	5984	6077	6086	6085	6070	5980	5836	5726
Значення частоти обертання чорного диска з 4 смужками через скло	5712	5802	5896	5900	5910	5905	5899	5893	5808	5709

Отримавши результати вимірювань знаходимо невизначеність результатів по формулах поданих вище, за типом А. Результати записуємо в таблицю 3.2:

Таблиця 3.2 Результати обробки даних отриманих із експерименту

Значення частоти обертання	Значення частоти обертання через скло	Різниця між зразковими та дійсними значеннями температури Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
5728	5712	16	82,5	4331,25
5847	5802	45	53,5	2862,25
5984	5896	88	10,5	110,25
6077	5900	177	78,5	6162,25
6086	5910	176	77,5	6006,25
6085	5905	180	81,5	6642,25
6070	5899	171	72,5	5256,25
5980	5893	87	11,5	132,25
5836	5808	28	70,5	4970,25
6726	5709	17	81,5	6642,25
		98,5		43115,5

де 98,5 – середнє значення Δ_c , 43115,5 – сума значень $(\Delta - \Delta_c)^2$

Звідси отримуємо невизначеність роботи приладу в порівнянні із зразковим, яка визначається із формули:

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n(n-1)}} \quad (3.22)$$

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{43115,5}{10(10-1)}} = 21,89$$

3.2.1 Розрахунок невизначеності похибки від відстані

Точність показів тахометра SE-100 залежить від віддаленості об'єкта вимірювання. Згідно з паспортними характеристиками, прилад розрахований на роботу в діапазоні 15–150 мм. Щоб оцінити вплив цього фактора на похибку результатів, було проведено серію експериментів. Як контрольне значення використано частоту обертання білого диска з чорним маркером на дистанції 20 мм (1729 об/хв). Надалі вимірювання здійснювалися зі зміною відстані від 15 до 60 мм із кроком 5 мм.

Аналогічну процедуру було застосовано до чорних дисків, а також до зразків із кількістю маркерів від одного до чотирьох. Оброблена інформація представлена в таблицях 3.3–3.10.

Таблиця 3.3 Результати обробки даних отриманих із експерименту

Відстань,мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	1728	1	16.3	265.69
20	1733	4	13.3	176.89
25	1737	8	9.3	86.49
30	1749	20	2.7	7.29
35	1753	24	6.7	44.89
40	1755	26	8.7	75.69
45	1749	20	2.7	7.29
50	1750	21	3.7	13.69
55	1754	25	7.7	59.29
60	1753	24	6.7	44.89
		17.3		782.1

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{782.1}{10(10-1)}} = 2.95$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.17\%$

Далі вимірювання проводим на білому диску з двома чорними смужками на контрольній відстані 20 мм (частота обертання 3333). Результати обчислень наведені в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 Результати обробки даних отриманих із експерименту

Відстань, мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	3321	12	14.2	201.64
20	3326	7	19.2	176.89
25	3310	23	3.2	10.24
30	3301	32	5.8	33.64
35	3302	31	4.8	23.04
40	3307	26	0.2	0.04
45	3302	31	4.8	23.04
50	3302	31	4.8	23.04
55	3300	33	6.8	46.24
60	3297	36	9.8	96.04
		26.2		633.85

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{633.85}{10(10-1)}} = 2.65$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.08\%$

Далі вимірювання проводим на білому диску з трьома чорними смужками на контрольній відстані 20 мм (частота обертання 4811). Результати обчислень наведені в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 Результати обробки даних ортиманих із експерименту.

Відстань,мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	4858	47	30.5	930.25
20	4841	30	13.5	182.25
25	4807	4	12.5	156.25
30	4820	9	7.5	56.25
35	4818	7	9.5	90.25
40	4815	4	12.5	156.25
45	4821	10	6.5	42.25
50	4827	16	0.5	0.25
55	4831	20	3.5	12.25
60	4829	18	1.5	2.25
		16.5		1628.5

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{1628.5}{10(10-1)}} = 4.25$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.09\%$

Далі вимірювання проводим на білому диску з чорирьма чорними смужками на контрольній відстані 20 мм (частота обертання 6159). Результати обчислень наведені в таблиці 3.6

Таблиця 3.6 Результати обробки даних ортиманих із експерименту

Відстань, мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	6159	0	7.8	60.84
20	6158	1	6.8	46.24
25	6155	4	3.8	14.44
30	6178	19	11.2	125.44
35	6159	0	7.8	60.84
40	6146	13	5.2	27.04
45	6147	12	4.2	17.64
50	6153	6	1.8	3.24
55	6149	10	2.2	4.84
60	6146	13	5.2	27.04
		7.8		387.6

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{387.6}{10(10-1)}} = 2.08$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.03\%$

Аналогічно проводим вимірювання на чорному диску з білою смужкою на контрольній відстані 20 мм (частота обертання 1608). Результати обчислень наведені в таблиці 3.7

Таблиця 3.7 Результати обробки даних отриманих із експерименту

Відстань, мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	1602	6	1.3	1.69
20	1601	7	0.3	0.09
25	1602	6	1.3	1.69
30	1599	9	1.7	2.89
35	1600	8	0.7	0.49
40	1601	7	0.3	0.09
45	1602	6	1.3	1.69
50	1602	6	1.3	1.69
55	1598	10	2.7	7.29
60	1600	8	0.7	0.49
		7.3		18.1

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{18.1}{10(10-1)}} = 0.45$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.03\%$

Далі вимірювання проводим на чорному диску з двома білими смужками на контрольній відстані 20 мм (частота обертання 3083). Результати обчислень наведені в таблиці 3.8

Таблиця 3.8 Результати обробки даних отриманих із експерименту

Відстань, мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	3078	5	0.9	0.81
20	3088	5	0.9	0.81
25	3074	9	3.1	9.61
30	3073	10	4.1	16.81
35	3071	12	6.1	37.21
40	3079	4	1.9	3.61
45	3082	1	4.9	24.01
50	3090	7	1.1	1.21
55	3086	3	2.9	8.41
60	3080	3	2.9	8.41
		5.9		111.1

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{111.1}{10(10-1)}} = 1.11$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.04\%$

Далі вимірювання проводим на чорному диску з трьома білими смужками на контрольній відстані 20 мм (частота обертання 4485). Результати обчислень наведені в таблиці 3.9

Таблиця 3.9 Результати обробки даних отриманих із експерименту

Відстань, мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	4490	5	31	961
20	4478	7	29	841
25	4480	5	31	961
30	4487	8	28	784
35	4480	5	31	961
40	4446	39	3	9
45	4432	53	17	289
50	4411	74	38	1444
55	4404	81	45	2025
60	4402	83	47	2209
		36		10484

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{10484}{10(10-1)}} = 10.79$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.24\%$

Далі вимірювання проводим на чорному диску з чотирьма білими смужками на контрольній відстані 20 мм (частота обертання 5728). Результати обчислень наведені в таблиці 3.10

Таблиця 3.10 Результати обробки даних отриманих із експерименту

Відстань, мм	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
15	5802	74	15.7	246.49
20	5820	92	2.3	5.29
25	5836	108	18.3	334.89
30	5819	91	1.3	1.69
35	5808	80	9.7	94.09
40	5814	86	3.7	13.69
45	5829	101	11.3	127.69
50	5811	83	6.7	44.89
55	5824	96	6.3	39.69
60	5814	86	3.7	13.69
		89.7		922.1

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{922.1}{10(10-1)}} = 3.20$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.06\%$

3.2.2 Розрахунок невизначеності від кута спостереження

Точність показів тахометра залежить від кута спостереження, тобто кута між лазерним променем та площиною обертового диска. Методика роботи з приладом SE-100 передбачає проведення вимірювань у положенні, максимально наближеному до перпендикуляра відносно поверхні.

Для оцінки впливу цього фактора на невизначеність результатів було виконано серію експериментів. Як еталонне значення обрано частоту 1729 об/хв, зафіксовану на білому диску з чорним маркером із відстані 20 мм під кутом 90 градусів. Подальші дослідження полягали у поступовій зміні кута нахилу в межах від 90 до 99 градусів із кроком в один градус.

Аналогічну методику застосували для чорного диска, а також для зразків із кількістю маркерів від одного до чотирьох. Оброблена інформація за результатами цих дослідів представлена в таблицях 3.11–3.18.

Таблиця 3.11- Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти обертання на 1 швидкості	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
90	1752	23	2.2	4.84
91	1754	25	4.2	17.64
92	1751	22	1.2	1.44
93	1752	23	2.2	4.84
94	1748	19	1.8	3.24
95	1749	20	0.8	0.64
96	1748	19	1.8	3.24
97	1749	20	0.8	0.64
98	1750	21	0.2	0.04
99	1745	16	4.8	23.04
		20.8		59.6

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{59.6}{10(10-1)}} = 0.81$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.05\%$

Далі було проведено контрольне вимірювання частоти обертання білого диска з двома чорними маркерами на відстані 20 мм та кутом 90 градусів (частота обертання 3333 об/хв) Результати оброблених даних наведені в таблиці 3.12

Таблиця 3.12 - Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти обертання на 1 швидкості	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
90	3389	56	1.9	3.61
91	3386	53	1.1	1.21
92	3389	56	1.9	3.61
93	3376	43	11.1	123.21
94	3382	49	5.1	26.01
95	3381	48	6.1	37.21
96	3388	55	0.9	0.81
97	3390	57	2.9	8.41
98	3396	63	8.9	79.21
99	3394	61	6.9	47.61
		54.1		330.9

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{330.9}{10(10-1)}} = 1.92$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.06\%$

Далі було проведено контрольне вимірювання частоти обертання білого диска з трьома чорними маркерами на відстані 20 мм та кутом 90 градусів (частота обертання 4811 об/хв) Результати оброблених даних наведені в таблиці 3.13

Таблиця 3.13 - Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти	Різниця між зразковими та	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
-------------------	------------------	---------------------------	---------------------	-------------------------

	обертання на 1 швидкості	дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв		
90	4902	91	7.7	59.29
91	4912	101	17.7	313.29
92	4921	110	26.7	712.89
93	4895	84	0.7	0.49
94	4890	79	4.3	18.49
95	4893	82	1.3	1.69
96	4877	66	17.3	299.29
97	4893	82	1.3	1.69
98	4877	66	17.3	299.29
99	4883	72	11.3	127.69
		83.3		1833.9

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{1833.9}{10(10-1)}} = 4.51$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.09\%$

Далі було проведено контрольне вимірювання частоти обертання білого диска з чотирма чорними маркерами на відстані 20 мм та кутом 90 градусів (частота обертання 6159 об/хв) Результати оброблених даних наведені в таблиці 3.14

Таблиця 3.14- Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти обертання на 1 швидкості	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
90	6209	50	23.4	547.56
91	6206	47	26.4	696.96
92	6218	59	14.4	207.36
93	6227	68	5.4	29.16
94	6230	71	2.4	5.76
95	6235	76	2.6	6.76
96	6252	93	19.6	384.16
97	6244	85	11.6	134.56
98	6246	87	13.6	184.96
99	6257	98	24.6	605.16
		73.4		2802.4

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{2802.4}{10(10-1)}} = 5.58$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.09\%$

Далі було проведено контрольне вимірювання частоти обертання чорного диска з білим маркером на відстані 20 мм та кутом 90 градусів (частота обертання 1608 об/хв) Результати оброблених даних наведені в таблиці 3.15

Таблиця 3.15 - Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти обертання на 1 швидкості	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
90	1602	6	4.7	22.09
91	1600	8	2.7	7.29
92	1601	7	3.7	13.69
93	1598	10	0.7	0.49
94	1594	14	3.3	10.89
95	1595	13	2.3	5.29
96	1599	9	1.7	2.89
97	1598	10	0.7	0.49
98	1593	15	4.3	18.49
99	1593	15	4.3	18.49
		10.7		100.1

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{100.1}{10(10-1)}} = 1.05$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.07\%$

Далі було проведено контрольне вимірювання частоти обертання чорного диска з двома білими маркерами на відстані 20 мм та кутом 90 градусів (частота обертання 3083 об/хв) Результати оброблених даних наведені в таблиці 3.16

Таблиця 3.16 -Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти обертання на 1 швидкості	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
-------------------	---	--	---------------------	-------------------------

90	3074	9	2.7	7.29
91	3080	3	8.7	75.69
92	3074	9	2.7	7.29
93	3096	13	1.3	1.69
94	3076	7	4.7	22.09
95	3069	14	2.3	5.29
96	3065	18	6.3	39.69
97	3068	15	3.3	10.89
98	3070	13	1.3	1.69
99	3067	16	4.3	18.49
		11.7		190.1

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{190.1}{10(10-1)}} = 1.45$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.05\%$

Далі було проведено контрольне вимірювання частоти обертання чорного диска з трьома білими маркерами на відстані 20 мм та кутом 90 градусів (частота обертання 4485 об/хв) Результати оброблених даних наведені в таблиці 3.17

Таблиця 3.17 - Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти обертання на 1 швидкості на відстані від 15 до 60 мм	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
90	4521	36	17	289
91	4532	47	6	36
92	4538	53	0	0
93	4540	55	2	4
94	4578	93	40	1600
95	4562	77	24	576
96	4549	36	17	289
97	4544	41	12	144
98	4546	61	8	64
99	4554	31	22	484
		53		3450

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{3450}{10(10-1)}} = 6.19$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.14\%$

Далі було проведено контрольне вимірювання частоти обертання чорного диска з чотирьма білими маркерами на відстані 20 мм та кутом 90 градусів (частота обертання 5728 об/хв) Результати оброблених даних наведені в таблиці 3.18

Таблиця 3.18 - Результати обробки даних отриманих із експерименту

Кут спостереження	Значення частоти обертання на 1 швидкості	Різниця між зразковими та дійсними значеннями частоти обертання Δ , об/хв	$\Delta - \Delta_c$	$(\Delta - \Delta_c)^2$
90	5801	73	18.3	334.89
91	5799	71	20.3	412.09
92	5830	102	10.7	114.89
93	5837	109	17.7	313.29
94	5821	93	1.7	2.89
95	5835	107	15.7	246.49
96	5826	98	6.7	44.89
97	5837	109	17.7	313.29
98	5816	88	3.3	10.89
99	5791	63	28.3	800.89
		91.3		2594.5

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{2594.5}{10(10-1)}} = 5.36$$

У відносних одиницях $U_A(\bar{q}) = 0.09\%$

3.2.3 Бюджет невизначеності.

З отриманих даних складемо бюджет невизначеності, який запишемо в таблицю 3.19

Таблиця 3.19 - Бюджет невизначеності вимірювання частоти обертання за допомогою тахометра «SE-100»

Джерело невизначеності	Тип оцінки	Відносна стандартна невизначеність вимірювання, %
1	2	3
Невизначеність, викликана від впливу відстані до об'єкту вимірювання (білий диск з чорним маркером).	A	$U_A = 0.17$
Невизначеність, викликана впливом відстані до об'єкту вимірювання (білий диск з двома чорними маркероми).	A	$U_A = 0.08$
Невизначеність, викликана впливом відстані до об'єкту вимірювання (білий диск з трьома чорними маркероми).	A	$U_A = 0.09$
Невизначеність, викликана впливом відстані до об'єкту вимірювання (білий диск з чотирма чорними маркероми).	A	$U_A = 0.03$
Невизначеність, викликана впливом відстані до об'єкту вимірювання (чорний диск білий маркер).	A	$U_A = 0.03$
Невизначеність, викликана впливом відстані до об'єкту вимірювання (чорний диск з двома білими маркероми).	A	$U_A = 0.04$
Невизначеність, викликана впливом відстані до об'єкту вимірювання (чорний диск з трьома білими маркероми).	A	$U_A = 0.24$

Продовження таблиці 3.19

1	2	3
Невизначеність, викликана впливом відстані до об'єкту вимірювання (чорний диск з чотирма білими маркероми).	A	$U_A = 0.06$

Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (білий диск чорний маркер).	A	$U_A = 0.05$
Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (білий диск з двома чорними маркерами).	A	$U_A = 0.06$
Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (білий диск з трьома чорними маркерами).	A	$U_A = 0.09$
Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (білий диск з чотирма чорними маркерами).	A	$U_A = 0.09$
Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (чорний диск білий маркер).	A	$U_A = 0.07$
Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (чорний диск з двома білими маркерами).	A	$U_A = 0.05$
Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (чорний диск з трьома білими маркерами).	A	$U_A = 0.14$
Невизначеність, викликана впливом кута спостереження (чорний диск з чотирма білими маркерами).	A	$U_A = 0.09$
Невизначеність, викликана впливом завади	A	$U_A = 0.37$
Сумарна невизначеність		$U_c = 0.549$
Розширена невизначеність ($k=2$)		$U=1.098$

У цьому розділі досліджено причини виникнення похибок у роботі пірометрів, а також виконано розрахунок похибок для тахометра моделі SE-100. Крім того, здійснено аналіз та обчислення невизначеності вимірювань. За результатами розрахунків встановлено, що сумарна невизначеність становить 0,549. Враховуючи припущення про нормальний закон розподілу, розширена невизначеність для рівня довіри 0,9% дорівнює 1,098.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., Ванько В.М., Бойко Т.Г.; Метрологія та вимірювальна техніка : Підручник / Є.С. Поліщука. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003.-544 с.
2. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник.- Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 200.- 360 с.
4. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки.: Навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 460с.
5. Чинков В.М. Основи теорії похибок засобів вимірювальної техніки.: Навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 88с. 52.
6. Основи метрології та вимірювань / Д.Б. Головка, К.Г. Рего, Ю.О. Скрипник.- К.: Либідь, 2001.-408 с.
7. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів.- Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.
8. Тахометр [Електронний ресурс]. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: <https://cxem.net/avto/electronics/4-15.php>
9. Піндус Н.М. Метрологія,технологічні вимірювання та прилади [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=366>
10. Чеховський С.А., Середюк О.Є., Петришин І.С.,Піндус Н.М.,Ващишак С.П.,Витвицька Л.А.,Кононенко М.А., Романів В.М. Метрологія і технологічні вимірювану внафтогазовій промисловості. Навч. посібник Факел, 2010, с. 500.
11. Піндус Н.М.,. Технологічні вимірювання і прилади: конспект лекцій. – Івано-Франківськ ІФНТУНГ, 2005.- 258 с

12. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів.- Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів.- Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.