**ЗМІСТ**

ВСТУП………………………………………………………………………………7

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТОЧНОСТІ…9

 1.1 Поняття про точність і методи вимірювань…………………………….9

 1.2 Похибки точності вимірювань………………………………………….18

 1.3 Методи підвищення точності вимірювань…………………………….22

1.3.1 Метод стабілізації параметрів статичних характеристик……...22

1.3.2 Метод структурної надмірності………………………………….24

1.3.3 Метод зменшення випадкової складової похибки………………25

1.3.4 Метод зменшення систематичної складової похибки…………..26

1.3.5 Метод зменшення систематичної складової похибки…………..27

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ……………………………………………………………………………….29

 2.1 Опис, призначення та принцип роботи турбінних лічильників газу.29

2.2 Алгоритмі опрацювання результатів вимірювань при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу…………………………………38

2.3 Турбінні лічильники як об’єкт метрологічних досліджень…………40

2.4 Застосування математичної статистики під час опрацювання вимірювальної інформації…………………………………………………44

2.5 Моделювання процесу вимірювання об’єму газу турбінним лічильником…………………………………………………………………..48

2.5.1 Графічна модель функціонування турбінного лічильника газу….48

2.5.2 Удосконалена математична модель турбінного лічильника газу..51

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ…………………………………………………………….59

3.1 Методика визначення коефіцієнта перетворення для корекції систематичної похибки турбінних лічильників газу…………………….59

3.2 Дослідження закономірностей зміни ентропійного коефіцієнту при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників……………………61

3.3 Підвищення точності вимірювання турбінних лічильників на стадії калібрування………………………………………………………………...62

ВИСНОВКИ………………………………………………………………………..70

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ………………………………………71

ДОДАТКИ…………………………………………………………………………..74

**ВСТУП**

**Актуальність теми.**Турбінні лічильники газу набули найпоширенішого попиту при облікуванні витрат природного газу. Через них проходить більше половини спожитого газу. На сьогоднішній час оцінювання точності промислових лічильників газу, в тому числі і турбінних, здійснюється за допомогою еталонних установок вимірювання об’єму і витрати газу. Зважаючи на те, що ці дослідження проводяться, в основному, на повітрі в силу практичної відсутності еталонних установок з функціонуванням на природному газі за великих витрат, то тема вдосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу заливається актуальною. Потрібні методи, які дозволять при обмеженій можливості використання потрібних еталонних установок отримати точні результати під час виконання повірок та калібрування турбінних лічильників газу.

**Об'єкт дослідження –** турбінні лічильники газу.

**Предмет дослідження** – методи оцінювання точності вимірювання об’єму газу турбінними лічильниками.

**Мета роботи:**дослідження методів оцінювання точності вимірювання об’єму газу турбінними лічильниками.

Для цього необхідно вирішити такі **завдання:**

* провести аналіз алгоритму опрацювання результатів вимірювань при метрологічних дослідженнях;
* провести теоретичні дослідження моделювання процесу вимірювання об’єму газу турбінним лічильником;
* розробити причинно-наслідкову діаграму виникнення похибки результату визначення об’єму турбінними лічильниками.;
* запропонувати методи вдосконалення точності вимірювання об’єму газу турбінними лічильниками.

 **Методи дослідження** - теоретичний аналіз, а також систематизація науково-теоретичних і методичних джерел; графічні методи; математичні методи; емпіричні методи; методи обробки даних.

**Публікації за час навчання -** VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Майбутній науковець – 2017». 1 грудня 2017р., Сєвєродонецьк, 2017. IІ Всеукраїнська науково-технічна конференція «сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод». 19-21 квітня 2018р., Сєвєродонецьк, 2017

**РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТОЧНОСТІ**

* 1. **Поняття про точність і методи вимірювань**

Вимірювання — пізнавальний процес визначення числового значення вимірюваної величини, дія, спрямована на знаходження значення [фізичної величини](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%96%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D0%B0) [дослідним](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82) шляхом, порівнюючи її з одиницею вимірювання за допомогою [засобів вимірювальної техніки](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D1%81%D1%96%D0%B1_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%97_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B8).

Числове значення вимірюваної величини — число, яке виражає [відношення](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F) між двома величинами однакової природи — вимірюваною та [одиницею вимірювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8F_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F).

Відповідно до стандарту [ДСТУ](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D1%96_%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B8_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8) 2681-94, вимірюванняє відображенням фізичних величин їх значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів [26, с. 36].

У цьому визначенні закладені такі головні ознаки поняття «вимірювання»:

* вимірювати можна властивості реально існуючих об'єктів пізнання — [фізичні величини](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%96%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D0%B0);
* вимірювання вимагає проведення дослідів, тобто теоретичні міркування чи розрахунки не замінять експеримент;
* результатом вимірювання є фізична величина, відбиває значення вимірюваної величини.

Згідно із Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність», що набрав чинності з 01.01. 2016 року, вимірюванням вважається процес експериментального визначення одного або декількох значень величини, які можуть бути обґрунтовано приписані величині.

За різними ознаками вимірювання фізичних величин можна розділити на різні групи:

* за характером зміни вимірювальної величини в часі;
* за способом одержання числового значення фізичної величина;
* за точністю вимірювання числових значень вимірюваної величини;
* залежно від одиниць вимірювання значення вимірюваних величин.

За характером зміни вимірювальної величини в часі вимірювання можна розділити на статичні і динамічні.

Статичні вимірювання – це вимірювання, при яких протягом певного проміжку часу вимірювана величина майже не змінюється або ж її значення змінюється поступово відповідно до процесу виробництва [26, с. 38].

Дані вимірювання в основному використовуються для встановлення взаємозв’язку між фізичними величинами одного й того ж об’єкта дослідження. Статичні вимірювання застосовуються у пасивних експериментах, забезпечуючи задовільний рівень наочності при зміні величин, що вимірюються, у певних проміжок часу (година, зміна, доба)

Динамічні вимірювання – вимірювання, які показують зміну вимірюваної величини в часі при різних збуреннях, що впливають а об’єкт дослідження або ж на засіб вимірювання [26, с. 38]. За допомогою цих вимірювань з’являється можливість вивчати динамічні властивості об’єкта і засобів вимірювальної техніки, особливо первинних перетворювачів (датчиків).

За способом одержання числового значення фізичної величина, яка вимірюється, поділяються вимірювання на прямі, посередні, сукупні та сумісні [26].

Прямими називаються такі вимірювання, за яких значення вимірюваної величини визначається безпосередньо за експериментальними даними (вимірювання довжини метром, вимірювання температури термометром, тиску манометром та ін.) [26, с. 40]. Прямі вимірювання являються найпростішими з вимірювань і їх використовують більш за інші.

Посередніми називаються такі вимірювання, за яких значення вимірюваної величини визначається за допомогою відомих математичних залежностей між цією величиною і величиною, яка визначається прямими вимірюваннями [26, с. 40]. До прикладу посередніх вимірювань можна віднести вимірювання рідини, яка знаходиться в циліндричній бочці, знаючи площу дна та висоту, яку займає рідина.

При сукупних вимірюваннях числове значення вимірюваної величини визначається розв’язком системи рівнянь, одержаних шляхом сукупних прямих вимірювань однієї або декількох однойменних величин [26, с. 41]. Як приклад можна назвати визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення.

При сумісних вимірюваннях одночасно вимірюють дві або декілька різнойменних величин для виявлення залежності між ними [26, с. 41]. Результати сумісні вимірювань використовують як правило у наукових дослідженях.

За точністю вимірювання числових значень вимірюваної величини вимірювання поділяються на три групи:

* вимірювання з максимально можливою точністю;
* контрольно-повірочні вимірювання;
* технічні вимірювання [26].

До першої групи належать вимірювання за допомогою еталонів, спрямовані насамперед на відтворення встановлених одиниць фізичних величин або фізичних констант. Також варто відзначити, що такі вимірювання необхідні при наукових дослідженнях високого рівня, або при розробках сучасних технологій в електроніці, атомній енергетиці і т.д.

До контрольно-повірочних відносять вимірювання, похибки яких не перевищують деяких наперед заданих значень. До таких вимірювань належать лабораторні вимірювання фізичних величин за допомогою зразкових і технічних засобів високих класів точності. Такі вимірювання проводяться у метрологічних лабораторіях Держстандарту Укриїни та науково-дослідницьких інститутах.

До третьої групи (технічних вимірювань) належать вимірювання, які проводяться у промисловості і визначаються невисоким класом точності засобів вимірювання.

Залежно від одиниць вимірювання значення вимірюваних величин можна розділити на абсолютні, відносні та приведені.

Абсолютними називаються вимірювання, значення яких подано у абсолютних одиницях фізичних величин (наприклад, тиск у паскалях, довжина в метрах, час у секундах і т.д.).

Відносними називаються вимірювання, значення яких подані як відношення вимірюваної величини до однойменної, умовно прийнятої за одиницю, або ж у відсотках (наприклад, вологість повітря) [26, с. 42]

Для вимірювання фізичної величини необхідно створити ряд умов: можливість виділення вимірюваної величини серед інших величин; можливість встановлення одиниці, необхідної для вимірювання виділеної величини; можливість матеріалізації (відтворення та зберігання) встановленої одиниці технічними засобами; можливість збереження незмінним розміру одиниці (в межах встановленої точності) як мінімум на термін, необхідний для вимірювань.

З метою забезпечення точності вимірювань фізичних величин у метрології розроблені способи використання принципів і засобів вимірювальної техніки, дотримання яких дозволяє уникнути при отриманні результатів вимірювань низки систематичних і випадкових похибок.

Принцип вимірювання — фізичне явище або сукупність фізичних явищ, які покладені в основу вимірювання певної фізичної величини. Наприклад, вимірювання температури за допомогою використання термоелектричного явища, зміни електричного опору терморезистора чи зміни тиску термометричної речовини манометричного термометра та ін.

Метод вимірювання — сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципів вимірювань для створення [вимірювальної інформації](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0_%D1%96%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F).

У виробництві та повсякденному житті у процесі вимірювань переважно застосовують прямі методи, що забезпечують визначення шуканої величини безпосередньо за експериментальними даними. До прямих методів вимірювання відносяться (рис. 1.1):

* метод безпосередньої оцінки
* метод порівняння з [мірою](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%96%D1%80%D0%B0_%D1%84%D1%96%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%BE%D1%97_%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D0%B8) – який за технічними особливостями може бути реалізований як:
* метод зіставлення;
* [компенсаційний метод](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F) (нуль-метод);
* диференціальний (різницевий);
* метод одного збігу (ноніусний);
* метод подвійного збігу (метод коінциденції);
* метод заміщення.

**Метод безпосередньої оцінки**

**МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ**

**Порівняння з мірою**

Диференціальний

Компенсаційний

Зіставлення

Заміщення

Подвійного збігу

Одного збігу

Рис. 1.1 *-* Методи вимірювання

Метод безпосередньої оцінки — вимірювана величина зчитується безпосередньо з шкали, табло чи екрану показувального пристрою вимірювального приладу(наприклад, вимірювання зусилля пружинним динамометром, визначення маси зважуванням на циферблатній вазі, вимірювання електричного струму амперметром). Вимірювання цим методом не є складним, проте точність невисока, але простота методу, швидкість процесу вимірювання визначив його широке застосування на практиці.

Метод порівняння з мірою полягає в тому, що вимірювана величина порівнюється з величиною, що відтворена мірою.

Міра — це засіб вимірювань, що реалізує відтворення та (або) збереження фізичної величини заданого значення.

Метод порівняння відрізняється постійною участю міри в процесі вимірювань (причому за показниками вимірювального приладу оцінюється лише частина вимірюваної величини). Результат вимірювання визначається як сума значень порівняльної міри (наприклад, зважування на аналітичній вазі) і показу вимірювального приладу. Точність методу порівняння значно вища за точність методу безпосередньої оцінки, але складність застосовування приладів і самого процесу вимірювання інколи обмежує його застосування.

Метод зіставлення — це метод порівняння з мірою, коли вимірювана і відтворена мірою величини одночасно діють на пристрій порівняння. Значення шуканої величини визначається після досягнення рівноваги (наприклад, визначення маси на вазі важільного типу, як суми мас гир, що її зрівноважують).

[Компенсаційний метод вимірювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%B2%D0%B8%D0%BC%D1%96%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F) (нуль-метод) – метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини з величиною, що відтворюється мірою, яка регулюється, до їх повного зрівноваження.

Компенсаційний метод є одним з варіантів методу порівняння з мірою, у якому результуючий ефект впливу величини на прилад порівняння зводять до нуля (вимірювальний прилад повинен показати нульове показання), а значення вимірюваної величини приймається рівним значенню міри. Прикладами компенсаційного методу являються: вимірювання електричної напруги зрівноваженим вимірювальним мостом; зважування маси на важільній вазі з використанням набору гир.

Даний метод вимірювання вирізняється високою точністю, яка залежить від чутливості нуль-індикатора, що контролює досягнення компенсації та від точності задання величини, що компенсує вимірювану величину.

Переважно нульовий метод вимірювання базується на компенсації (урівноваженні) електричної напруги або електрорушійної сили (е.р.с.), що вимірюється, напругою, яка створюється на відомому електричному опорі струмом від допоміжного джерела. Метод застосовують не лише для вимірювання електричних величин (напруги, струму, опору), але й для вимірювання інших фізичних величин (механічних, світлових, температури), значення яких заздалегідь перетворюють в електричні.

Цей метод використовується в автоматичних вимірювальних приладах: вимірювальних мостах, потенціометрах, аналізаторах рідин та газів тощо.

Диференціальний (різницевий) метод полягає у визначенні вимірювальним приладом різниці між вимірювальною величиною та відомої (відтвореної) величини (наприклад, вимірювання надлишкового тиску [диференційним манометром](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80_%D0%B4%D0%B8%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%B9)).

Диференціальний метод поєднує в собі частину ознак методу безпосередньої оцінки і частина ознак нульового методу. Він може дати досить точний результат вимірювання, якщо тільки вимірювана величина і мера мало відрізняються один від одного. Наприклад, якщо різниця цих двох величин дорівнює 1% і похибка вимірювання - 1%, то загальна похибка вимірювання шуканої величини зменшується до 0,01%.

Точність диференціального методу зростає зі зменшенням різниці між порівнюваними величинами.

Метод одного збігу (ноніусний) полягає у тому, що збігання між вимірюваною величиною і величиною відтвореною мірою визначається за збігом міток [шкал](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D0%B0) або періодичних сигналів. Цей метод використовують при вимірюванні точних сигналів часу, [частоти](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B0) обертання з використанням [стробоскопа](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF), розмірів [штангенциркулем](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%80%D0%BA%D1%83%D0%BB%D1%8C) тощо.

Метод подвійного збігу (метод коінциденції) Метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням двох квантованих фізичних величин: вимірюваної та відтворюваної багатозначною нерегульованою мірою.

Прикладом методу подвійного збігу є вимірювання зістикованих інтервалів часу або зістикованих відрізків довжини за допомогою відповідно: послідовності періодичних імпульсів з відомим значенням їх періоду або лінійки з відомим значенням поділок.

Метод заміщення — це метод порівняння, в якому вимірювана величина *X* заміщується величиною *Х0*, що відтворюється регульованою мірою. Точність методу заміщення залежить тільки від похибки міри і практично не залежить від систематичної похибки вимірювального приладу, що є суттєвою перевагою методу заміщення. Метод використовується у засобах вимірювальної техніки високої точності, в тому числі в еталонах.

Говорячи про методи вимірювань фізичних величин не слід зупинятись на перелічених вище методах. Є інші методи, які широко використовуються при метрологічних роботах і технологічних вимірюваннях. До одних з таких методів належать електричні методи вимірювання неелектричних величин (температури, рівня, тиску, витрат) [10]. До таких методів належать наступні електричні методи:

* тензометричні;
* індукційні;
* фотоелектричні;
* п’єзоелектричні.

Тензометричний метод ґрунтується на використанні тензорезисторів, які змінюють свій опір під дією деформацій механічних чутливих елементів (наприклад, мембран) [26, с. 44]. Сучасні тензорезистори, які використовуються у засобах вимірювання тиску (наприклад, "Сапфір-22"), виготовляються методом плазмового напилювання і забезпечують одержання результатів вимірювань тиску з досить високою точністю. Основними перевагами таких перетворювачів є використання незначних деформацій чутливих елементів, що підвищує їх надійність, стабільність лінійних характеристик, а також забезпечує вібростійкість.

П'єзоелектричний метод ґрунтується на використанні властивостей деяких кристалічних матеріалів утворювати електричні заряди на їх поверхні під дією прикладеної сили. Це явище називається п'єзоефектом [26, с. 45]. Для первинного перетворювача як правило використовують монокристал кварцу. Це пояснюється тим, що він має значні переваги над іншими матеріалами (механічна міцність, високі ізоляційні якості, незалежність п'єзоелектричних властивостей від температури у широкому діапазоні (20 400 °С) та ін.) Кварцеві пластини вирізаються перпендикулярно до електричної осі монокристалу кварцу. Під дією тиску р на електричних гранях пластини виникають електричні заряди. Завдяки "стіканню" заряду п'єзоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання динамічних навантажень, тисків, вібрацій. Вони надзвичайно жорсткі, мають високу частоту власних коливань та незначні деформації. Крім того, вони дуже малі за розмірами [26].

Ємнісний метод ґрунтується на зміні ємності датчика за рахунок діелектричних властивостей самого середовища. Цей метод можна використовувати при вимірюванні рівня, густини, вологості та інших технологічних параметрів, використовуючи при цьому відому формулу площинного конденсатора При вимірюванні рівня або вологості між пластинами конденсатора використовується діелектрик, діелектрична проникливість якого значно вища за діелектричну проникливість повітря, це й зумовлює зміну ємності залежно від висоти заповнення діелектриком простору між обкладками конденсатора. Вологість речовини визначається за рахунок наявної вологи у матеріалі — чим більше вологи, тим вища ємність [26, с. 45]. Слід звернути увагу на те що ємнісні засоби вимірювань легко можна використовувати у вибухонебезпечних виробництвах.

Тепер поговоримо про такий важливий елемент результату вимірювання, як точність. Точність результату вимірювання - характеристика якості вимірювання, що відображає близькість до нуля похибки його результату. Ці похибки є наслідком багатьох причин: недосконалість засобів вимірювань, методів вимірювань, досвіду оператора, недостатній старанності проведення вимірювання, впливу зовнішніх умов і т. д. Для зменшення похибок необхідно усунути або зменшити вплив кожної з причин їх появи. Точність вимірювань звичайно характеризується похибкою вимірювання. Вважається, що чим менша похибка вимірювання, тим більше його точність.

**1.2 Похибки точності вимірювань**

Точність будь-якого вимірювання визначається зазначенням його похибки, тобто кількісної характеристики відхилення результату вимірювання від істинного значення фізичної величини, що вимірюється. Виникнення похибок вимірювань обумовлено впливом різноманітних за фізичною природою факторів, що супроводжують вимірювання. Традиційний аналітичний підхід до визначення похибок полягає в їх поділі на складові, кожна з яких зумовлена певними факторами. Це дозволяє досліджувати джерела складових похибки, проводити необхідні експерименти, в тому числі допоміжні вимірювання, і, як наслідок, визначати властивості похибки та з необхідною точністю оцінити її складові. Знаючи властивості й оцінки складових, можна правильно врахувати їх при оцінці повної похибки, а також за необхідності ввести поправку в результат вимірювання й (або) організувати вимірювальний експеримент так, щоб звести окремі складові, а з ними й повну похибку до допустимого значення [15].

Для підвищення об’єктивності оцінки похибок вимірювань і визначення шляхів їх зменшення, з метою покращання якості вимірювань, необхідно знати причини виникнення різних складових повної похибки вимірювань і закономірності їх змінювання.

При вимірюванні фізичної величини треба чітко знати й розмежовувати розмежувати два поняття: істинні значення фізичної величини та результати їх вимірювань.

Істинне значення фізичної величини - це значення, що ідеально відображає властивості об’єкта як у кількісному, так і в якісному відношеннях. Істинні значення не залежать від засобів нашого пізнання і є абсолютною істиною, до якої наближається спостерігач, намагаючись виразити її як числове значення.

Результат вимірювання – це продукт пізнання спостерігача і являється приблизною оцінкою значення шуканої величини. Результати залежать від методів вимірювання, технічних засобів, властивостей органів чуття спостерігача, зовнішнього середовища й самих фізичних величин [26, с 49].

Відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної фізичної величини і є похибкою вимірювання.

Похибку загалом можна знайти за такою формулою:

 (1.1)

де *х*  - результат вимірювання величини;

*хіст*  істинне значення вимірювальної величини.

Існує значна кількість класифікацій похибок, в залежності від обраних класифікаційних ознак, але найпоширенішими можна назвати такі (рис. 2.1):

* за формою вираження;
* за джерелами виникнення;
* за закономірностями виникнення та прояву.

**ПОХИБКИ**

**За джерелами виникнення**

**За формою вираження**

**За джерелами виникнення**

Систематична

Випадкова

Абсолютна

Відносна

Особиста

Методична

Інструментальна

Рис. 1.2 - Класифікація похибок вимірювання

Похибки точності вимірювання в залежності від форми вираження поділяють на абсолютні та відносні.

Абсолютна похибка вимірювання - це похибка вимірювання, яка виражається в одиницях вимірюваної величини.

Відносна похибка вимірювання - це похибка вимірювання, виражена як відношення абсолютної похибки до результату вимірювання [1].

Відносну похибку у частках вимірюваної величини (1.2) або у відсотках (1.3) знаходять із співвідношень:

 (1.2)

 (1.3)

де *∆* - абсолютна похибка;

*х* – результат вимірювання

За джерелами виникнення похибки точності вимірювання бувають наступні: інструментальні, методичні та особисті (похибки оператора).

Інструментальна похибка - складова похибки вимірювання, зумовлена властивостями засобу вимірювання. Дана похибка в свою чергу може містити декілька компонентів, таких як, похибку засобу вимірювання та похибку обумовлену взаємодією засобу вимірювання з об'єктом вимірювання.

Методична похибка — складова похибки вимірювання, що обумовлена недосконалістю методу вимірювання або невідповідністю об'єкта вимірювання його моделі, прийнятій для вимірювання.

Особиста похибка(похибка оператора) - складова похибки вимірювання, яка обумовлена індивідуальними властивостями оператора. Точніше сказати, що похибка залежить від психофізіологічних якостей оператора, зокрема, від недосконалості органів чуттів, які беруть участь у визначенні результату вимірювання (зору, слуху, швидкості реакції на сигнал), від здатності до концентрації уваги, від ступеня стомленості і т. ін. Велику роль відіграє кваліфікація експериментатора.

Особиста похибка вимірювання характерна тільки для аналогових вимірювальних приладів і до неї можна віднести два різновиди.

Першим різновидом є похибка відліку, яка обумовлена округленням показників під час їх відліку оператором зі шкали аналогового вимірювального приладу. Вона проявляється в тому, що однаковий показник приладу, два різних оператори можуть зчитувати по-різному. Наприклад, прилад показує 25,3 – один оператор зчитує 25, 0, а другий – як 25,5.

Другий різновид особистої похибки вимірювань це похибка, яка обумовлена взаємним розташуванням ока експериментатора, стрілки вказівника і шкали аналогового вимірювального приладу [5].

Очевидно, такі похибки не можуть бути заздалегідь передбачені і вказані в технічній документації аналогових вимірювальних приладів. У цифрових вимірювальних приладах операція округлення виконується автоматично, а похибка округлення, що виникає при цьому, називається похибкою квантування, вона нормується і вказується в технічному описі приладу.

За закономірностями виникнення та прояву розрізняють систематичні та випадкові похибки.

Систематична похибка - являється складовою загальної похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини [1].

Випадкова похибка - складова загальної похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини. Таким чином, повна похибка вимірювання є сумою систематичної та випадкової похибок. Випадкові похибки можна виявити шляхом проведення повторних вимірювань, оскільки вони призводять до мінливості їх результатів. В цьому відношенні більш небезпечними є систематичні похибки, оскільки вони часто лишаються непоміченими. Якщо змінну систематичну похибку ще можна виявити за результатами повторних вимірювань методами дисперсійного аналізу або інженерними методами, то не існує математичних методів для виявлення постійних систематичних похибок. Постійні систематичні похибки можуть бути виявлені в результаті ретельного аналізу вимірювальної процедури (методики вимірювання) або експериментально в результаті спеціальних досліджень.

Існує також надмірна похибка, яку б варто було виділити в окрему групу.

Надмірна похибка - похибка вимірювання, яка істотно перевищує очікувану за даних умов похибку.

Результати, що містять надмірну похибку, називаються промахами. Такі результати необхідно виявляти та вилучати.

**1.3 Методи підвищення точності вимірювань**

**1.3.1 Аналіз похибок засобів вимірювання**

Розпочнемо з того, що первинні вимірювальні перетворювачі (датчики), вимірювальні прилади, регулятори, а також системи дистанційних передач та інші засоби у виробничих умовах експлуатуються у складних умовах, які змінюються в часі. Це обумовлено тим, що контрольований виробничий процес, як і сам технологічний процес, змінюється у широких межах. Зміна технологічних параметрів і умов зовнішнього середовища (температури, тиску, вологості, вібрації) значно впливають на точність засобів вимірювальної техніки, на їхні статичні та динамічні характеристики. Кожний із чинників, що впливає та характеристики точності може бути виміряний окремо і врахований при одержанні результатів вимірювань, але слід сказати, що у виробничих умовах експлуатації всі їх врахувати майже неможливо. Тому кожний засіб вимірювання поряд з нормованою чутливістю до вимірюваної величини певним чином реагує на різні чинники, які обумовлюють підвищення похибки засобів вимірювання [26].

В умовах експлуатації статичні похибки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) визначаються за відхиленням реальних статичних характеристик *у(х)* від номінальних функцій перетворення *у0(х)*, які одержані у нормальних умовах їх роботи, тому забезпечення високої точності вимірювань пов'язано з мінімізацією цього відхилення:

 (1.4)

Подивимось, як впливають основні чинники на похибку вимірювань *∆у*.

Слід зазначити, що крім вимірювальної величини у рівняння будь-якого ЗВТ входять конструктивні параметри ЗВТ, які змінюють свої характеристики як у процесі експлуатації, так і при зміні зовнішнього середовища. Таким чином у загальному вигляді рівняння вихідної величини засобу вимірювальної техніки можна записати так:

*у = F (x; l1; l2;... ρ1; ρ2;.. . U; f … t; р; М),* (1.5)

де *l1, l2*— конструктивні розміри деталей;

*ρ1, ρ2*— фізичні характеристики матеріалів засобу вимірювань;

*U, f* — напруга і частота джерела електричної енергії;

*t, p, M* — температура, тиск, вологість зовнішнього середовища.

Варто зазначити, що залежно від технологічних чинників, коливань напруги чи частоти у мережі, зміни зовнішніх умов в процесі експлуатації значення *l, р, U, f, t, p, M* можуть відрізнятись від номінальних значень. Спираючись на функціональної залежності (1.5) можна розрахувати похибки засобів вимірювання при зміні кожного параметра означеного рівняння.

Визначимо зміну показань засобу вимірювання, яка викликана зміною лише одного якогось параметра, наприклад *l1* а всі решта залишаються постійними. Значення параметрів змінюються зазвичай досить обмежено, тому приріст функції можна розглядати як такий, що дорівнює її диференціалу:

*∆yl1 = ∆l1 dy / dl1* (1.6)

Відхилення Δ*l* параметра деталі засобу вимірювання від номінального значення називається первинною абсолютною похибкою, вираз Δ*l1dy /dl1* - частковою похибкою.

Аналогічно можна розрахувати похибки засобу вимірювання при зміні решти параметрів. Загальна похибка засобу вимірювання визначається сумою похибок від зміни всіх параметрів:

*∆y = ∆yl1 + ∆yl2 + ∆yρ1 + … + ∆yU + ∆y + … +∆yt + ∆yp + ∆yM* (1.7)

Якщо ж відомі статичні характеристики окремих ланок засобу вимірювань, то доцільніше спочатку розрахувати похибки для окремих ланок, а потім на їхній основі розрахувати загальну похибку засобу вимірювання.

У загальному вигляді статична характеристика довільної ланки має вигляд:

*у = f(x1; l1; l2; ...ρ1; ρ2; ... U; f ... p; t; М)* (1.8)

Похибка довільної ланки Δ*yi* буде частковою похибкою вимірювального засобу Δ*yi = dy / dyi*. Для знаходження часткової похідної *dy / dyi* складається рівняння скороченого вимірювального кола *у = f(yi)*, з якого і визначається часткова похідна *dy / dyi (уп)*.

На основі аналізу рівнянь (1.5), (1.8) можна визначити два методи зменшення похибок результатів вимірювань: метод стабілізації параметрів статичних характеристик та метод структурної надмірності [26].

**1.3.2 Метод стабілізації параметрів статичних характеристик**

Даний метод зводиться до підвищення стабільності параметрів статичних характеристик засобів вимірювання або ж до зведення до мінімуму часткових похибок Δ*yli*; Δ*уρi,* Δ*yU;* Δ*yf* тощо. Ці методи підвищення точності результатів вимірювань називаються конструктивними, або технологічними [26].

Стабілізація статичних характеристик на основі конструктивних методів полягає у виготовленні засобів вимірювань та їх елементів із сучасних високотехнологічних матеріалів, характеристики яких майже не залежать від зміни параметрів зовнішнього середовища, а також у термостату-ванні як вимірюваного середовища, так і засобів вимірювань та стабілізації джерел живлення, у використанні сучасних технологій та методів вимірювань тощо. Відмінною рисою конструктивних методів є включення в засоби вимірювань тільки тих елементів і вимірювальних перетворювачів, без яких процес вимірювання взагалі неможливий.

Конструктивні методи підвищення точності широко використовувалися у приладобудівній промисловості. їх ще називають *класичними методами.*Проте класичні методи майже вичерпали свої можливості, бо серед сучасних засобів вимірювань широкого використання набули мікропроцесорні обчислювальні системи, за допомогою яких опрацьовується інформація, вводяться термокомпенсації, здійснюється лінеаризація характеристик та ін. [26, c. 106].

**1.3.3 Метод структурної надмірності**

Інший метод підвищення точності результатів вимірювань полягає у введенні в процес вимірювань структурної або ж тимчасової надмірності. Це дає можливість одержати додаткову інформацію про вимірювану величину та про перешкоди, що виникають у процесі вимірювань. Опрацювання таких даних вимірювань за спеціальними алгоритмами дозволяє підвищити точність вимірювань. Ці способи одержали назву структурних методів підвищення точності вимірювань.

Відмінною особливістю структурних методів є забезпечення високоточних результатів вимірювань на звичайних засобах вимірювань, без зміни вимог щодо поліпшення їхніх метрологічних показників. Необхідна точність вимірювань досягається за рахунок опрацювання додаткової інформації за спеціальними алгоритмами. При сучасному стані обчислювальної техніки виконання допоміжних перетворень і обчислювальних операцій у багатьох випадках ефективніше й економічніше, ніж удосконалення конструкції і технології виробництва засобів вимірювання з метою одержання точніших метрологічних характеристик [26].

**1.3.4 Метод зменшення випадкової складової похибки**

Метод зменшення випадкової складової похибки засобів вимірювань ґрунтується на математичному опрацюванні результатів багаточисельних та багатоканальних вимірювань величин *х*. Якщо ж виконано *n* незалежних вимірювань величини *х*, то результати вимірювань опрацьовуються за алгоритмами[26, c. 107]:

 (1.9)

 ; (1.10)

Результат багаторазових вимірювань *nх*матиме в  раз меншу середньоквадратичну похибку *σ* порівняно з результатом одноразового вимірювання.

Випадкову складову похибки вимірювального засобу можна зменшити, якщо збільшувати число вимірювань *n*, але слід зауважити, що це не завжди можливо, або доречно, бо у реальності у виробничих умовах кількість вимірювань зазвичай обмежена. Дане обмеження обумовлене змінами вимірюваної величини в часі (динамікою об'єкта), систематичної складової похибки за час багаторазових вимірювань та характеристик (властивостей) самого об'єкта.

Другий спосіб зменшення складової випадкової похибки ґрунтується на математичній обробці результатів багаточисельних та багатоканальних вимірювань. Величина *х* вимірюється кількома засобами вимірювання *k*, що працюють паралельно (3B1, 3B2, ..., ЗВk). Кількість вимірювань зростає у *nk* разів. Результати багатоканальних і багаторазових вимірювань *m'х* дають у  разів меншу середньоквадратичну похибку порівняно з результатом одноразового вимірювання [26, c. 107]. При обробці результатів вимірювання слід користуватись обчислювальним засобом, схему якого подано на рис. 1.3, за формулами (1.9) і (1.10).



Рис. 1.3 - Схема зменшення випадкової похибки для багаторазових і багатоканальних вимірювань

До недоліків багатоканальних вимірювань можна віднести складність у виборі засобів вимірювань з ідентичними метрологічними характеристиками.

**1.3.5 Метод зменшення систематичної складової похибки**

Для зменшення систематичної похибки вимірювань широко використовується метод, який ґрунтується на паралельних вимірюваннях величини *х* за допомогою зразкових засобів вимірювання або мір. Вимірювання величини *х* проводиться в декілька етапів (рис. 1.4). Спочатку вимірюється величина х за допомогою звичайного засобу вимірювання (ЗВ1), а потім за допомогою зразкового засобу (33В). Засоби вимірювання підключаються по черзі за допомогою перемикача П. Результати вимірювань після перемикача подаються в обчислювальний засіб (O3), де вони опрацьовуються і визначається систематична складова похибки як різниця вимірювальних величин *mх* за допомогою звичайного та зразкового засобів вимірювань.



Рис. 1.4 - Схема зменшення систематичної складової похибки за допомогою зразкових засобів вимірювання

Вимірювана величина визначається за алгоритмом:

(1.11)

Систематична похибка вимірювання визначається як різниця між математичними сподіваннями, одержаними за результатами вимірювань за допомогою зразкових та звичайних технічних засобів вимірювальної техніки.

Якщо використовується кілька мір (рис. 1.5), то процес вимірювання проходить у наступній послідовності: спочатку вимірювана величина *х* через перемикач П подається на звичайний засіб вимірювання (ЗВ), а далі на обчислювальний засіб (ОЗ). За допомогою перемикача П вимірювана величина *х* відключається, і послідовно підключаються відомі міри *х1*, *х2* та ін. їм відповідають вихідні сигнали після ЗВ: *y1*, *у2*. [26]



Рис. 1.5 - Схема зменшення систематичної складової похибки з використанням зразкових мір

При лінійній статичній характеристиці засобу вимірювання достатнім буде використати дві міри. Як і у першому разі отримана вимірювальна інформація опрацьовується на обчислювальному засобі (03), де при лінійній статичній характеристиці засобу вимірювання реалізується інший алгоритм:

 (1.12)

Використання зразкових засобів і мір дозволяє звести до мінімуму систематичну складову похибки. Випадкова складова похибки залежить від кількості вимірювань *n* величини *х*, а опрацювання результатів вимірювань проводиться за алгоритмами (1.9) і (1.10). Обчислювальний засіб забезпечує одночасне визначення як систематичної, так і випадкової складової похибки і вимірюваної величини за алгоритмами (1.9)—(1.12) [1, с. 110].

**РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТУРБІННИХ**

**ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ**

**2.1 Опис, призначення та принцип роботи турбінних лічильників газу**

Турбінні лічильники газу широко використовуються в інженерній практиці. Вони прості в монтажі та в експлуатації, а також характерні високою надійністю та точністю. Саме це і являється причиною для їх застосування при вирішенні інженерних питань. Варто звернути увагу на те, що турбінні лічильники обліковують до 70% всього спожитого газу.

Турбінні витратоміри (лічильники) є приладами обробки сигналу, що широко використовуються в технології виробництва, дають можливість надійного, безперервного і точного виміру кількості рідин (або газу чи пари), що протікає в закритому трубопроводі, який знаходиться під тиском. Турбінні лічильники відносяться до класу тахометричних, загальною ознакою яких є обертання чутливого елементу (перетворювача) під дією рушійного моменту, який створюється потоком. Таким елементом у турбінних лічильників є тангенціальна або аксіальна турбіна [7,12,22].

Турбінні витратоміри служать для виміру потоку рідин (газів) широких меж в'язкості, калібруючи їх відповідно в’язкості. Вимір поширюється на вимірювання повної кількості рідини, що протікає по цьому поперечному перерізу. Турбінні витратоміри виготовляються з підшипниками ковзання, твердий сплав - тефлон і тому їх можна застосовувати для роботи з майже будь-якою речовиною, навіть із такою, яка здійснює сильний агресивний вплив. Також їх можна застосовувати у вибухонебезпечному середовищі завдяки іскробезпечному виконанню.

Слід зазначити, що практично донедавна турбінні лічильники рідко використовувалися для вимірювання об’ємної витрати природного газу. Це пояснювалося тим, що рушійний момент на газі незначний. Але, зважаючи на можливість вдосконалення конструкції, застосування нових матеріалів та методів опрацювання результатів вимірювання ними суттєво змінило ситуацію.

Типовий турбінний лічильник складається з трьох основних вузлів: аеродинамічно збалансованої турбіни, корпусу та відлікового пристрою [12] (Додаток А).

Турбінні витратоміри (лічильники) бувають двох типів (рис. 2.1): з аксіальною турбіною, вісь якої збігається з напрямком досліджуваного потоку і з'єднана передачею (3) з лічильником обертів (2), і з вертикальною турбіною - вісь якої безпосередньо зв'язана з лічильником обертів (3). Перша група лічильників застосовується для вимірювання малих, а друга — великих витрат продукції.



Рис. 2.1 – Лічильник з аксіальною і вертикальною турбіною

Загальна конструкція турбінних витратомірів: корпус, підключається до трубопроводу фланцевим або різьбовим з'єднанням. По кінцях корпусу витратоміра розташовані передні і задні направляючі. По осьовій лінії усередині корпусу розміщується крильчатка турбіни (ротор), яка складається з маточини і відлитих заодно з нею лопостей, що мають точну кручену поверхню. Ротор може встановлюватися як в шарикопідшипники (відкриті, напівзакриті, закриті) або в підшипники ковзання (тефлон, твердий сплав, напр. карбід Вольфрама. або інший спеціальний сплав). Реагує на обертання ротора індуктивний датчик,який розміщується на стінці корпусу турбінного витратоміра, у великих (номінальним діаметром 100 мм і понад) на маточину ротора монтується для передачі сигналу зубчастий диск. У першому виконанні індуктивне збудження викликають самі лопаті ротора, у другому - зубчастий диск. Індуктивний датчик складається: з котушки, якоря, розташованого усередині котушки, постійного магніту.

Існують різні типи турбін [12] (рис. 2.2):

* аксіальні при малому (а) і великому (б) діаметрах;
* тангенціальні зі світловідбивними пластинками (в),
* в багатоструменевих водолічильниках (г),
* в одноструменевих водолічильниках з напівциліндричними лопостями (е)
* і з лопостями напівшарової форми (ж)



Рис. 2.2 – Види турбін, які застосовуються в лічильниках

Стосовно принципу роботи турбінний витратомір є приладом, що приймає швидкість рідини (або пари, газу), яка протікає через трубопровід. На шляху рідини (яка протікає по витратоміру) розташовано ходове колесо (ротор), число оборотів ротора пропорційно швидкості потоку. Швидкість обертання лопостей ротора сприймається індуктивним датчиком. При протіканні по обмотці електричного струму виникає електромагнітне поле, яке посилюється металевим осердям. Коли лопості турбінного колеса пронизують електромагнітне поле індуктивного датчика, електромагнітне поле посилюється, з'являється електромагнітний імпульс, який по лініях електричного зв'язку передається на вторинний прилад. Чим частіше швидкість потоку газу, тим частіше з'являється електромагнітний імпульс. Для створення гальмівного моменту застосовують постійний магніт. Вторинний прилад налаштований на частоту електромагнітних імпульсів, генерованих індуктивним датчиком. Частота напруги, що відображається на вторинному приладі, пропорційна швидкості потоку вимірюваного середовища.

Розміри отворів для подачі газу до турбіни розраховані так, щоб забезпечити необхідні швидкості потоків газу в трубопроводі за максимальної витрати лічильника. Таким чином втрати тиску на лічильнику мінімальні. Проте, оскільки енергія обертання лопатей турбіни – це кінетична енергія потоку, то конструктивно отвори виконуються як направляючі для збільшення швидкості газу і її дії на лопатки турбіни. Турбіна виконується з великим радіусом лопаток, щоб створити максимальну рушійну силу. Для конкретних умов експлуатації окремо виготовляють та проектують турбінний лічильник, чим забезпечується необхідна висока точність і діапазон вимірювання для конкретних завдань.

Для більш детального ознайомлення з турбінними лічильниками газу, з їх будовою, параметрами та принципами роботи з ними візьмемо до уваги лічильники ЛГ-К-Ех.

Лічильник газу турбінний ЛГ-К-Ех (далі – лічильник) призначений для вимірювання об'єму природного газу за ГОСТ 5542-87 при проведенні обліку в т.ч. комерційному [13, с. 3].

Лічильник, як і типовий, складається з трьох основних вузлів: аеродинамічно збалансованої турбіни, корпусу та відлікового пристрою. Вимірювач і відліковий пристрій зв′язані між собою магнітною муфтою [13].

Вимірювач розміщений в корпусі лічильника, який має вхідний і вихідний приєднувальні фланці. В корпусі лічильника зі сторони вхідного фланця установлений дільник потоку. До зовнішньої поверхні корпуса лічильника прикріплений відліковий пристрій. Відліковий пристрій можна повертати на 350º, а сумуючий механізм – на 300º. Лічильник (залежно від виконання) має штуцер для термоперетворювача опору, а також масляний насос (залежно від виконання).

У відліковому пристрої лічильника вмонтовані генератори імпульсів, які формують високочастотні і низькочастотні сигнали. Датчики імпульсів призначені для формування імпульсів пропорційно обсягом пройшов через лічильник газу для зовнішніх пристроїв (наприклад, електронних коректорів). Підключення всіх датчиків імпульсів до зовнішніх пристроїв повинно здійснюватися екранованим кабелем [13, с. 5].



Рис. 2.3 - Схема розміщення виводів вихідних сигналів лічильника

На лічильнику обов’язково повинно бути маркування і пломбування. На лічильниках ЛГ-К-Ех має бут наступне маркування:

* напис «Вироблено в Україні»;
* товарний знак або назва підприємства-виробника;
* знак затвердження типу згідно з ДСТУ 3400:2006;
* назва й умовна познака лічильника;
* порядковий номер лічильника за системою нумерації підприємства-виробника;
* рік виготовлення;
* максимальний робочий надлишковий тиск, МРа;
* максимальна об′ємна витрата в робочих умовах, m3/h;
* мінімальна об′ємна витрата в робочих умовах, m3/h;
* діапазон робочих температур, ºC;
* об'єм газу за один імпульс вихідного сигналу, m3/imp;
* ступінь захисту лічильника згідно з ГОСТ 14254-96.

Стосовно пломбування лічильника, то воно проводиться при випуску з виробництва, повірці та здаванні в експлуатацію (Додаток В).

При випуску з виробництва та повірці пломби встановлюють:

- на кріпильних гвинтах кришок відлікового пристрою, вилки роз'єднувача і

таблички;

- на штуцерах, біля яких нанесене маркування «Pm», «tm»\*\*\*) і „HF3”.

На штуцерах, біля якого нанесене маркування «Рm» і «tm»\*\*\*) пломбування здійснює представник технічного контролю. В інших місцях пломбування здійснює державний повірник.

При здаванні лічильника в експлуатацію пломбування здійснює представник метрологічної служби газопостачальної організації, втановлючи пломби:

* на гайках у місцях кріплення фланців лічильника із фланцями трубопроводу;
* на штуцері «Pm» після встановлення перетворювача тиску для контролю тиску на вході лічильника;
* на штуцері «tm»\*\*\*) після встановлення термоперетворювача опору [13].

Познака лічильника:

* лічильника без штуцера для термоперетворювача опору:

«Лічильник газу G Qnom ЛГ – К – DN – і - Рроб – В - Ех »;

* лічильника з штуцером для термоперетворювача опору:

«Лічильник газу G Qnom ЛГ - К- DN – і – Рроб – В – Т – Ех»,

де Qnom - познака типорозміру лічильника – це сполучення літери G та числового значення номінальної витрати газу, Qnom, (в робочих умовах), вимірюваної лічильником в кубічних метрах за годину, яке наведене в таблиці (Додаток В);

DN – номінальний діаметр лічильника, значення якого наведене в таблиці (Додаток В);

*і* – відносний робочий діапазон витрат – це відношення між витратами Qmin та Qmax , тобто між мінімальною та максимальною витратами, за яких лічильник працює в межах допустимих похибок;

Рроб – максимальний робочий надлишковий тиск, на який розрахована конструкція лічильника, значення якого наведене в таблиці (Додаток В);

В – умовна познака виконання лічильника в залежності від кліматичного виконання та діапазону температур навколишнього повітря і вимірюваного середовища, в якому функціонує лічильник, значення «В» наведено в таблиці (Додаток В);

Т – лічильник з штуцером для термоперетворювача опору;

Ех- знак, який вказує що лічильник призначений для роботи з коректором, який пройшов сертифікацію та випробування на вибухозахищеність.

Важливим кроком до отримання високої точності вимірювання витрат газу і правильної роботи турбінного лічильника є початкова стадія експлуатації: робота за призначенням, розміщення та монтаж.

Лічильник повинен бути підібраний за номінальним діаметром, пропускною здатністю та робочим тиском. Номінальні діаметри лічильника, фільтра і прямих ділянок до і після лічильника повинні бути однакові. (Додаток Б)

Що стосується монтажу лічильника, то його встановлюють в мережу так, щоб потік газу протікав через нього у напрямі, який вказує стрілка, що розміщена на корпусі лічильника. Газовий потік повинен поступати в лічильник без поштовхів і пульсацій. Обв'язка лічильника повинна забезпечувати плавну зміну тиску газу в трубопроводі, особливо при запуску лічильника та його зупиненні. Газ повинен відповідати ГОСТ 5542-87 [13].

Лічильник монтують в горизонтальному положенні та встановлюють між двох прямих ділянок трубопроводу (не менше 5DN i 3DN або 4DN) круглого

перерізу (додаток Б). Кожна з ділянок трубопроводу вважається круглою, якщо будь-яке з не менш як 4-х значень його внутрішнього діаметра, виміряних в одній площині через рівні кути, відрізняється від середнього арифметичного цих значень не більше ніж на:

- ± 1 % - у перетині на відстані від 0 до DN перед лічильником;

- ± 2 % - у перетині безпосередньо після лічильника.

Перед лічильником обов'язково встановити фільтр, який не пропускає через себе механічні домішки, що перевищують 0,150 mm. Технічне обслуговування фільтра проводиться згідно експлуатаційної документації на

відповідний фільтр.

 Лічильник працює при певному робочому надлишковому тиску, що обумовлює його використання і створює експлуатаційні обмеження. Максимальне значення тиску, при якому дозволяється застосовувати лічильник,

маркується на табличці.

Газовий потік повинен поступати в лічильник без поштовхів і пульсацій. Обв'язка лічильника повинна забезпечувати плавну зміну тиску газу в трубопроводі, особливо при запуску лічильника та його зупиненні. Газ повинен відповідати ГОСТ 5542-87.

Для недопущення ушкодження лічильника при пусконалагоджувальних

роботах запуск лічильника на робочий режим при наявності байпасного газопроводу проводять в наступній послідовності:

а) відкривають байпасний газопровід і подають газ до вимірювального

трубопроводу в необхідному режимі експлуатації;

б) плавно відкривають запірний пристрій на вході лічильника та заповнюють вимірювальний трубопровід і лічильник газом до робочого тиску ( при цьому рекомендується, щоб швидкість підвищення тиску не перевищувала 35 kPa/s);

в) плавно відкривають запірний пристрій на виході лічильника, не допускаючи різких стрибків витрати газу;

г) плавно закривають запірний пристрій байпасного газопроводу.

При запуску лічильника на робочий режим у випадку відсутності байпасного газопроводу послідовно виконують операції, зазначені б і в.

Перевіряють герметичність всіх вузлів та з'єднань на вимірювальному трубопроводі, з'єднувальних (імпульсних) лініях та герметичність приєднання термоперетворювача опору надлишковим тиском , величина якого повинна бути не менше 1,25 максимального робочого тиску, вказаного в паспорті на лічильник, протягом 15 хв. Після цього виконуються вимірювання об'єму газу.

Потік газу, який проходить через лічильник, приводить в обертання турбінне колесо, число обертів якого в робочому діапазоні вимірювання витрати (*Qmin – Qmax*) пропорційне об'єму газу, що пройшов через лічильник. Обертання турбінного колеса за допомогою зубчастої передачі і магнітної муфти передається на вісь барабанів відлікового пристрою.

Ідеальний турбінний лічильник не має сил опору, характеризується нескінченно тонкими лопатками турбіни, сумарна рушійна сила сконцентрована в середній точці радіуса, а також має рівномірний розподіл швидкості на лопаті в осьовому напрямку [11].

Мінімальна витрата турбінного лічильника зазвичай визначається серією випробувань при низькому тиску, щоб встановити витрату, при якій лічильник досягає прийнятних показів (мінімальних, коли він уже є працездатним). Мінімальна витрата для будь-якого іншого тиску може бути знайдена шляхом прирівнювання рушійних моментів при нових умовах до визначених при випробуваннях з врахуванням густини газу[23]:

 (2.1)

Так як:

 (2.2)

де *PB, P, KB, K* – значення абсолютного тиску газу та коефіцієнта стисливості для умов випробування та експлуатації відповідно;

*qvB(min), qvmin* – робоча об’ємна витрата через турбінний лічильник для умов випробування та експлуатації (нові умови) відповідно.

Спільне розв’язання формул (1.4) і (1.5) дає наступне [23]:

 (2.3)

Таким чином бачимо, що мінімальна робоча об’ємна витрата через турбінний лічильник змінюється як корінь квадратний з відношення тисків. Максимальна вимірювана робоча об’ємна витрата через турбінний лічильник визначається механічними і міцнісними властивостями турбіни, а також максимально можливим ударним навантаженням на її опори [11]. Зазвичай, конструкція повинна забезпечувати необхідну градуювальну характеристику лічильника, що визначає його умови застосування та діапазон вимірювання.

**2.2 Алгоритмі опрацювання результатів вимірювань при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу**

Опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу виконується безпосередньо після їх закінчення відповідно до чинних методик та нормативних документів і базується на опрацюванні результатів визначення коефіцієнта перетворення лічильника. Алгоритм визначення похибки лічильника можна подати наступним чином [11, c. 19]:

1) визначення коефіцієнта перетворення еталонного лічильника проводять шляхом пропускання через нього контрольного об’єму повітря, що відтворюється еталоном одиниць об’єму та об’ємної витрати газу, за витрат визначених в ТЗ на еталонний лічильник. За кожного значення об’ємної витрати, дослідження повторюють не менше 7 разів.

2) за результатами кожного дослідження отримують вибірку миттєвих значень витрати і за ними визначаються усереднені значення об’ємної витрати *qv*;

3) за усередненими значеннями об’ємної витрати, параметрами газу та діаметром умовного проходу еталонного лічильника обчислюють число Рейнольдса Re, як основну характеристику виду потоку;

4) визначається об’єм за робочих умов за результатами вимірювань еталонного лічильника турбінного типу за кількістю імпульсів отриманих з робочого еталона та коефіцієнтом перетворення лічильника;

5) розраховуються коефіцієнти стискуваності робочого середовища для умов досліджуваного та еталонного лічильника згідно з [2];

6) розраховується об’єм газу за стандартних умов за результатами вимірювань еталонного та досліджуваного лічильників.

9) визначається абсолютна похибка результатів вимірювання лічильником газу за відповідних значень об’ємної витрати;

10) визначається відносна похибка лічильника газу за відповідних значень об’ємної витрати за робочих умов і критерію Рейнольдса, розрахованого для умов лічильника.

11) за результатами визначеннями похибки лічильника на кожній витраті визначають середнє значення похибки, оцінку середньоквадратичного відхилення (СКВ), довірчі границі похибки.

В даному алгоритмі не здійснюються певні процедури, а саме: ідентифікація закону розподілу значень об’єму, що носить випадковий характер, і не оцінюється вплив параметрів оточуючого середовища, що вносить систематичний дрейф у отримані значення результатів вимірювання об’єму. Також відомо, що коефіцієнт перетворення лічильника *К*, який береться із градуювальної характеристики, залежить від критерію Рейнольдса, але фізична модель експерименту, виконана іноземними авторами, доводить, що він залежить і від низки інших факторів, якими нехтують під час опрацювання результатів метрологічних досліджень.

При цьому існує два способи дослідження метрологічних характеристик

турбінних лічильників газу: «старт з ходу» і «старт з місця». Через інерційність турбінних лічильників метод «старт з місця» не використовується. Надається перевага методу «старт з ходу», де завдяки синхронізації по імпульсах не відбувається втрата вимірювальної інформації [11].

**2.3 Турбінні лічильники як об’єкт метрологічних досліджень**

Опрацювання результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу виконують враховуючи основні показники якості вимірювання. При цьому контролюють і основні метрологічні характеристики лічильників. Основні показники якості вимірювання та основні метрологічні характеристики турбінних лічильників регламентуються відповідно до Держспоживстандарту України, який набув чинності від 01.01.2007 [4].

Під час виконання метрологічних досліджень турбінних газових лічильників, а також проведення метрологічної атестації, важливим моментом є можливість відтворення одного і того ж контрольного значення об’єму за різних умов (різними засобами і методами, в різний час та в різних місцях). Така характеристика вимірювання називається відтворюваністю. Визначення відтворюваності результатів вимірювання об’єму газу турбінними лічильниками проводять після 24 годин технологічного прогону еталонного лічильника, який проводять після першого циклу його досліджень. При цьому визначають та записують у протокол наступні параметри:

* контрольний об’єму, що відтворюється еталоном (*VКj*), м3;
* час проходження контрольного об’єму (*tji*), с;
* кількість імпульсів з еталонного лічильника (*Nji*);
* надлишковий тиск у еталоні (*PЕi*) та перед (або у) еталонним лічильником, (*Рji*), Па;
* температури у еталоні (*TEjі*), та на виході (вході) в еталонний лічильник (*Tji*), оС;
* атмосферного тиску (*Рaj*), Па.

Для кожного *і*-го вимірювання за даного *j*-го значення об’ємної витрати проводять наступні обчислення:

* значення об’єму, що пройшов через еталонний лічильник [8]:

 (2.1)

де *Тс* –значення температури за стандартних умов, oC.

* коефіцієнта перетворення еталонного лічильника[8]:

 (2.2)

* середнє значення коефіцієнта перетворення еталонного лічильника за *j*–го значення об’ємної витрати для п результатів вимірювань:

 (2.3)

Відтворюваність визначають шляхом порівняння коефіцієнтів перетворення еталонного лічильника із коефіцієнтами перетворення визначеними при повторному циклі досліджень. Повторний цикл досліджень проводять для всіх значень об’ємних витрат визначених при першому циклі досліджень. За кожного значення об’ємної витрати проводять не менше 3 досліджень [11].

Оцінку відтворюваності для *j*-го значення об’ємної витрати визначається за формулою [21]:

 (2.4)

де *KÂj*– середнє значення коефіцієнта перетворення еталонного лічильника за *j*-го значення об’ємної витрати, що визначений при повторному циклі досліджень.

Зі всієї множини отриманих значень оцінки відтворюваності за кінцеве приймають максимальне значення. Еталонний лічильник вважається таким, що пройшов державну метрологічну атестацію (ДМА) і допускається до застосування, якщо границі відносної похибки еталонного лічильника не перевищують значення наведені у ДСТУ 3383:2007 [3], а максимальне значення відхилення експериментальних коефіцієнтів перетворення від значень, які розраховані за апроксимаційним поліномом не перевищують 0,2 %, оцінка відтворюваності не перевищує половини довірчих границь відносної похибки еталонного лічильника за *j*-того значення витрати. У тому випадку, якщо буде невідповідність однієї із метрологічних характеристик еталонного лічильника вимогам, то еталонний лічильник вважається непридатним і не допускається до застосування.

Під час планування вимірювального експерименту загалом одним із основних завдань є зведення до мінімуму випадкової похибки. В цьому випадку говорять про збіжність результатів вимірювання, а саме про близькість повторюваних контрольованих результатів вимірювання об’єму газу в однакових умовах. Для метрологічних досліджень цей показник якості вимірювань має вагоме значення і оцінюється як і відтворюваність результатів за допомогою середньоквадратичного відхилення [11, с. 17].

У Державній повірочній схемі для засобів вимірювання об’єму та об’ємної витрати газу (ДСТУ 3383:2007) наводяться також і вимоги до стабільності та лінійності метрологічних характеристик лічильника. Зміни похибки лічильника за кожної витрати не повинні виходити за межі 0,2% для діапазону витрат від 0,25·qmax до qmax.

Похибку лічильника визначається за різних витрат газу в в певному порядку. Спочатку оцінюють похибку при витраті газу в 25% (0,25 qmax) від максимальної втрати газу для даного типу лічильника (qmax). Наступним кроком йде оцінка при витраті газу 0,70% від qmax, далі 40% від qmax, і на останок на максимальних витратах (qmax). Варто зазначити, що зміну від 0,4 qmax до qmax роблять через значення 1,10 qmax для того, щоб наблизитися до значення qmax від більшого значення витрати газу. При кожній витраті потрібно три рази оцінити похибку, при цьому витрати газу лишаються незмінними. Дана процедура (цикл) проводиться тричі. Випробування виконують з газом за атмосферних умов (±100 мбар) або за найнижчого тиску, для якого розроблено лічильник. Дев’ять похибок лічильника за кожної витрати не повинні перевищувати 0,2%. Під час випробування за витрати газу від 0,25 qmax до qmax за кожного випробувального тиску, різниця між найбільшою і найменшою похибкою лічильника не повинна перевищувати певних значень для забезпечення лінійності (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 - Допустимі різниці найбільшої і найменшої похибки лічильника

за кожного випробувального тиску

|  |  |
| --- | --- |
| Розмір | Тиск |
| ≤ 4 бар | > 4 бар |
| ≤ DN 100 | 1,0% | 0,5% |
| ≥ DN 100 | 1,0% | 0,3% |

Динамічний діапазон знаходиться у співвідношенні 1:50, а середнє зважене значення похибки (СЗП) повинне бути якомога ближче до нуля, наскільки це дозволяє калібрування та максимальна допустима похибка. СЗП не повинна виходити за межі ±0,4 %. СЗП обчислюють за формулою [4]:

 (2.5)

де *qi / qmax*— ваговий коефіцієнт;

*Еі* — похибка лічильника за витрати *qi* , %.

Якщо *qi = qmax*, то замість 1 треба застосовувати ваговий коефіцієнт 0,4.

Для врахування надійності, час експлуатації, енергоспоживання а інші одиничні показники застосовують комплексний показник якості (КПЯ) турбінних лічильників газу, оскільки одночасне досягнення оптимальних значень за кожним із цих показників є неможливим. КПЯ турбінних лічильників пропонується знаходити завдяки формулі [18]:

 (2.6)

де *аі*– відношення кожного аналізованого параметра *і*-го лічильника до такого ж порівнюваного базового показника;

*γi* – вагові коефіцієнти,

*N* – число лічильників-аналогів.

Проте КПЯ не враховує статистичних характеристик власне результатів вимірювання об’єму турбінними лічильниками, тому не має реального застосування при вирішенні мети роботи. При чому наведені показники якості при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу повинні знаходитися у встановлених межах [4].

При метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу основною його характеристикою є коефіцієнт перетворення *K*, який прямо пропорційний об’єму газу, пропущеному через лічильник, і обернено пропорційний кількості імпульсів отриманих із давача. Опрацювання результатів здійснюють на базі коефіцієнта перетворення.

**2.4 Застосування математичної статистики під час опрацювання вимірювальної інформації.**

Більшість результатів вимірювання представляють собою вибірку з деякої генеральної сукупності, яка може містити аномальні спостереження. Аномальні спостереження у вибірці появляються через грубі промахи під час реєстрації вимірювань, в результаті випадкових імпульсних завад, збоїв устаткування. Якщо дані різко виділяються на фоні більшості результатів спостережень, вони можуть бути виключені з вибірки на попередньому етапі аналізу результатів проведеного вимірювання з урахуванням фізичної суті вимірюваної величини. Результати, які входять до так званої сумнівної зони, розпізнаються складніше і вимагають застосування спеціальних статистичних процедур для виявлення аномальних спостережень [11]. Навіть після виявлення таких аномальних результатів не можна вважати аналіз точності виконання результатів вимірювання завершеним і правильним без ґрунтовних пояснень одержаних результатів.

Для забезпечення правильності опрацювання результатів спостережень, перевірки відхилень розподілів ймовірностей від нормального, коректного визначення основних методів розрахунку, оцінки точності методів і результатів вимірювання, розроблено низку нормативних документів і рекомендацій щодо їх застосування. Для прикладу деякі стандарти описують принципи планування експериментів та основний алгоритм кількісної оцінки прецизійності методів вимірювання на практиці, водночас ці стандарти є основою для прийняття рішень під час проведення лабораторних експериментів.

Застосування методів статистичного аналізу під час експериментальних досліджень передбачає виконання операцій, в результаті яких на підставі значень статистик критеріїв приймається рішення про відхилення або прийняття гіпотез, що перевіряються. Нормальність розподілу спостережуваних величин є необхідною передумовою для коректного застосування більшості класичних методів математичної статистики, яка використовується в метрологічних задачах [11].

Доцільним є дослідження критеріїв, за допомогою яких і перевіряється нормальність закону розподілу випадкових величин. Автоматичне видалення аномальних спостережень без встановлення причин їх виникнення виправдане і можливе лише тоді, коли створена модель спостереження добре вивчена і випробувана, тобто заздалегідь відома її поведінка.

В основному використовують статистичні критерії, за допомогою яких встановлюється закон розподілу спостережень і за відповідним алгоритмом опрацювання результатів експерименту, проводять видалення аномальних результатів, оскільки дуже часто відсутня інформація про якість вимірювання або ж ця інформація не є надійною. У випадку статистичного опрацювання набору даних, одержаних під час вимірювального експерименту, обов’язковим є виконання трьох послідовних етапів:

1. Перевірка на наявність промахів, оскільки результати спостереження, які різко відрізняються від інших, спотворюють кінцевий результат вимірювання.

2. Ідентифікація закону розподілу (перевірка нормальності), оскільки в основі процедур математичної статистики, які застосовуються в обробці результатів метрологічних досліджень, лежить нормальний закон розподілу, в іншому випадку виникає необхідність розроблення унікального методу опрацювання експериментальних даних.

3. Перевірка відтворюваності дослідів для підтвердження відсутності часової залежності та відносної стабільності зовнішніх умов під час проведення вимірювального експерименту [11].



Рис. 2.4 - Критерії математичної статистики, що використовуються

Для опрацювання результатів експериментальних досліджень

Критерії перевірки нормальності закону розподілу не завжди дають змогу ідентифікувати вид кривої розподілу результатів, а отже, постає задача вибору таких методів математичної статистики, які могли б ідентифікувати вид закону розподілу з достатньою вірогідністю.

Результати прямих вимірювань залежно від того, чи було проведено однократні чи багатократні спостереження опрацьовуються згідно з чинними нормативними документами. Відповідно до центральної граничної теореми вважається, що результати вимірювань розподілені нормально і підлягають подальшому статистичному опрацюванню, суть якого полягає у визначенні результату вимірювання із заданою імовірністю.

У процесі вимірювання об’ємної витрати газу, зважаючи на кореляційні зв’язки між параметрами процесу вимірювання, впливовими чинниками та результатом, необхідно вивчити їх взаємоповедінку та дослідити закон розподілу результату вимірювання турбінними лічильниками. Для цього доцільним є застосування підходів статистичної ідентифікації.

В основному, опрацювання результатів зводиться до визначення наступних величин:

* витрати газу (для цього застосовують розрахункові формули залежно від методу визначення витрати і типу застосовуваних лічильників);
* коефіцієнт стисливості газу розраховують згідно з [2];
* визначення основних параметрів газового середовища (абсолютного тиску, температури, густини, компонентного складу газу, поправочного множника на розширення вимірювального середовища, кінематичної та динамічної в’язкості, критерію Рейнольдса );
* визначення похибок вимірювання витрати та невизначеності результату.

Описані вище статистичні підходи застосовуються і для розв’язання прикладних технічних задач. Проте на сьогодні не існує універсального алгоритму математичного опрацювання результатів наукових досліджень у сфері вимірювання витрати природного газу, зокрема турбінними лічильниками, і навіть з урахуванням класичної теорії похибок та теорії невизначеності до кінця не відомо, як враховувати вплив додаткових чинників, не передбачених стандартом і методикою виконання вимірювань.

**2.5 Моделювання процесу вимірювання об’єму газу турбінним лічильником.**

**2.5.1 Графічна модель функціонування турбінного лічильника газу**

Перед початком треба звернути увагу на переваги турбінних лічильників [8,12,14]. До них належать:

* можливість роботи на високих температурах і тисках;
* встановлення на вертикальних (не всі) і горизонтальних трубопроводах;
* висока точність (похибка 0,5-1,5%);
* швидкодія (стала часу 100-500 мс);
* широкий діапазон вимірювання;
* лінійність характеристики в широкому діапазоні витрат;
* можливість вимірювання швидкозмінних потоків;
* надійність;
* простота експлуатації;
* відносно низька вартість.

Застосовуючи графічний метод структурного аналізу визначення причинно-наслідкового зв’язку (діаграма Ісікави) мжна проаналізувати чинники, які приводять до виникнення похибки результату визначення об’єму турбінними лічильниками. Застосування такого методу передбачає:

* ідентифікацію чинників та причин впливу на результат дослідження;
* групування визначених чинників за змістовими та причинно-наслідковими блоками;
* визначення пріоритетності чинників в умовах кожного окремого блока;
* відкидання тих чинників, на які ми не можемо вплинути;
* ігнорування малозначних чинників;
* аналіз остаточної картини діаграми.

Основною перевагою застосування діаграми Ісікави є її наочність, оскільки зв’язок виявлених чинників і причин з досліджуваним наслідком відображається у простій формі і може слугувати в подальшому з метою моделювання роботи засобу вимірювання.

При моделюванні роботи турбінного лічильника ключовою є кутова швидкість обертання лопатей турбіни [8], оскільки об'єм газу, пропущений через лічильник, змушує турбіну крутитися зі швидкістю пропорційною витраті газу, який подається на вхід лічильника. Зрозумілим стає, що в основу діаграми Ісікави покладено саме кутову швидкість обертання лопатей турбінки. Треба виділити фактори, які впливають на відхилення реальної кутової швидкості від ідеальної. В першу треба зазначити, що формують кутову швидкість обертання параметри, що зв’язані з конструкцією самого лічильника. До цих параметрів належать: довжина лопаті, радіус тіла турбінки, кут між лопатями, хорда лопаті головним чином формують кутову швидкість обертання і їх необхідно враховувати при моделюванні роботи турбінного лічильника перш за інші. Сповільнюють швидкість обертання турбінки сили механічного опору, які виникають через тертя в місцях підвісу турбіни, тертя в самих підшипниках та в радіальному зазорі між турбіною і корпусом лічильника, що спричиняє не лінійність між частотою обертання та миттєвою швидкістю потоку. Не можна нехтувати і гідродинамічними властивостями потоку, оскільки на вході в турбінку виникають «збурення» потоку через тертя газового середовища із торцевою частиною турбіни і поверхнями лопатей. Відповідно при моделюванні треба враховувати режим потоку. При цьому ключовими є густина, компонентний склад, в’язкість, тиск та температура газу. Звідси випливає, що рівняння роботи газового турбінного лічильника в реальних умовах, перш за все, повинно враховувати конструктивні особливості турбінного лічильника і параметри потоку. Структурно вплив перелічених чинників відображає діаграма Ісікави (Додаток Г).

Основні причини через які виникають відхилення реальної кутової швидкості від ідеальної можна отримати на основі причинно-наслідкової діаграми. До таких причин належать:

* сили механічного опору;
* геометричні параметри випробувальної ділянки (труби).
* сили аеродинамічного вимірного середовища;
* ефект завихрення вимірювального потоку;
* профіль швидкості вимірювального потоку.

Водночас, всі перелічені вище чинники можна класифікувати як такі, що формуються вимірювальним середовищем і ті, котрі спричинені конструктивними особливостями, самого лічильника, адже з діаграми [9] (додаток Г) видно, що багато гілок мають спільні «кістки». Кожен із наведених чинників формує результат вимірювання, а результат, у свою чергу, супроводжується сумарною похибкою вимірювання.

Крім технологічних параметрів процесу, що впливають на результат дослідження метрологічних характеристик турбінних лічильників газу, мають місце і наступні чинники, що вносять додаткову похибку:

* зміна зовнішніх умов;
* хімічний склад і густина газу, на якому проводиться повірка;
* температура, тиск газу в еталоні та в робочому лічильнику відповідно;
* зміна виду гідродинамічного потоку газу.

Для покращення існуючого алгоритму опрацювання вимірювань разом із особливостями установки розглядалися і особливості роботи лічильника, а саме: конструктивні особливості тіла лічильника, профіль швидкості вимірювального потоку, сили механічного та динамічного опорів, завихрення у вимірювальному потоці і фізико-хімічні властивості природного газу. [11, с. 46]. Діаграма Ісікави детально описує зміну поведінки сил, що діють на турбінку у процесі вимірювання об’єму.

**2.5.2 Удосконалена математична модель турбінного лічильника газу**

Перед тим, як розглядати експериментальні дослідження, необхідно змоделювати процес вимірювання об’єму за допомогою турбінного лічильника газу та дослідити вплив на результат вимірювання об’ємної витрати параметрів процесу вимірювання, впливових чинників з метою встановлення причинно-наслідкових зв’язків.

«Ідеальна» калібрована швидкість обертання турбінки визначається силами, які діють на турбінку, проте в реальних умовах вимірювального експерименту на реальному (газовому) середовищі існують сили дії на турбінку, які викликають відхилення кутової швидкості обертання від її ідеальної характеристики [7,8]. Дане відхилення можна охарактеризувати функцією безрозмірного відношення сил інерції до сил в'язкості. Це відношення є нічим іншим, як числом Рейнольдса. В основному, ці сили уповільнюють швидкість обертання турбінки, відповідно, збільшуючи похибку вимірювання витрати.

Турбінні газові лічильники призначені і відкалібровані в умовах рівномірного осьового потоку. А це означає, що якщо у потоці газу виникають завихрення на вході турбінки, то залежно від напрямку цих завихрень, турбінка може збільшити або зменшити швидкість обертання, що призведе до завищених або занижених показів лічильника, а отже споживач або постачальник можуть зазнати втрат.

Окрім сил опору вимірювального середовища, що сповільнюють рух турбінки, додатково має місце тертя у підшипниках ротора та механічні навантаження на привід індикаторів потоку. У [8] детально розглянуто природу утворення сил, що сповільнюють рух турбінки.

Теоретично можна описати ситуацію, коли не існувало б сил, що сповільнюють швидкість обертання турбінки, тоді вона обертатиметься зі швидкістю, що точно відтворює вектор швидкості потоку (на поверхню лопаті турбінки. На рис.2.2 зображено векторну діаграму для турбінки. Припускаючи, що лопаті турбінки плоскі і швидкість потоку однорідна і паралельна відносно осі, тоді з рис. 2.2 випливає:

(2.11)

де *r* – вектор радіусу турбінки, м;

*v* –вектор швидкості потоку, м/с;

*ωі*– ідеальна швидкість обертання, с-1;

*β* – кут нахилу лопатей турбіни відносно осі.

Якщо ввести в рівняння значення об’ємної витрати *qv*, то:

 (2.12)

*S* – площа поперечного перерізу потоку, м2;

 – ефективний радіус турбіни (середньоквадратичне значення внутрішнього та зовнішнього радіусу лопаті (R, r)), м.



Рис. 2.5 - Векторна діаграма для аксіальної турбіни

де *v* –вектор швидкості потоку;

*v*E – реальний вектор швидкості на виході потоку;

Ɵ – кут завихрення на виході потоку із врахуванням моменту сповільнюючи сил;

*β* – кут нахилу лопатей турбіни;

 *ω* – вектор кутової швидкості турбінки;

*r* – вектор радіусу турбінки;

F – сили опору вимірного середовища, що діють на поверхні кожної лопаті;

*с* – хорда лопаті;

*s* – довжина лопаті вздовж осі;

*c/s* – фактор міцності турбінки.

Дане відношення є наближеним виразом для коефіцієнту перетворення лічильника *К*, який за умов проведення експерименту визначається як функція від критерію Рейнольдса *K = f(Re)*. Відношення вважається теоретичним значенням коефіцієнту перетворення лічильника (надалі це відношення позначатиметься як *К*).

В ідеальних умовах проведення вимірювального експерименту відповідь лічильника на зміну швидкості потоку ідеально лінійна і визначається виключно геометричними параметрами лопаті. У реальних умовах існує низка впливових чинників, що сповільнюють рух лопаті турбінки. За умов стабільної витрати швидкість турбінки можна описати наступним чином:

Крутний момент робочого середовища

Гальмівний момент, що створюється на поверхні лопастей

Гальмівний момент давача обертання

Гальмівний момент створений підшипника пі ковзання

Гальмівний момент, створений втулками ротора і зазором

Рис. 2.6 - Протидіючі моменти, що виникають в турбінці

Повертаючись знову до рис.2.2, різниця між фактичною швидкістю обертання турбінки *rω* та ідеальною *rωі*, є швидкість ковзання турбінки за рахунок сукупного впливу моментів сил, що діють на неї, сповільнюючи швидкість (див. рис.2.3), в результаті чого вектор швидкості руху робочого середовища відхиляється. Введемо в рівняння змінну радіуса *r* і прирівнюючи повну швидкість зміни моменту імпульсу робочого середовища, що проходить через турбінку, сповільнюючий момент дорівнюватиме:

 (2.13)

що у свою чергу дорівнює:

 (2.14)

де *NT* сумарний сповільнюючий момент сил.

Зіставляючи рівняння (2.12) та (2.14) одержимо:

 (2.15)

У більшості конструкцій лічильників останні три з чотирьох гальмівних моментів з рис. 2.3 малі за нормальних умов експлуатації порівняно з крутним моментом, що виникає за рахунок вимушеного опору руху середовища по всій поверхні лопаті. Як зображено на рис.2.2 сила *F*, що виникає через цей ефект, діє в напрямку вздовж поверхні лопаті і визначається як:

 (2.16)

де *CD* коефіцієнт лобового опору;

*S* – площа поверхні лопаті з кожного боку, м2.

Використовуючи визначення коефіцієнта лобового опору в умовах турбулентного потоку цю силу можна визначити як [11]:

 (2.17)

Сповільнюючий момент, що створюється впливом опору вздовж

поверхні лопаті турбінки (з *n* лопатями) подано наступним чином [11]:

 (2.18)

Беручи до уваги рівняння (2.5) та (2.8), випливає:

 (2.19)

Рівняння (2.19) показує, що нелінійність зміни кутової швидкості за рахунок зміни витрати за нормальних умов експлуатації є функцією деяких основних геометричних параметрів та критерію Рейнольдса. Крім того, застосоване відхилення від наближених *ρqv2* залежить від гальмівного моменту робочого середовища за умов турбулентного потоку та інших процесів, що супроводжують зміну виду потоку від перехідного і до ламінарного, що свідчить про те, що нехтувати критерієм Рейнольдса не можна [11]. Це основна причина, чому осьові турбінні лічильники рекомендують для турбулентних потоків.

Завихрення потоку викликає пульсації, що у свою чергу вносить додаткову похибку в результат вимірювання. Критерій Рейнольдса загалом визначається відношенням сил інерції до сил в’язкості потоку [8]:

 (2.20)

де *ρC* – густина природного газу за робочих умов, кг/м3;

*D* –діаметр вимірювального трубопроводу, м;

*μ* – динамічна в’язкість газу, Па·с,

*qv*– об'ємна витрата газу, м3/с.

Очевидно, що для того, щоб оцінити вид потоку робочого середовища, необхідно знати параметри середовища і геометричні розміри ділянки труби. Коли мова йде про природний газ, то коефіцієнт динамічної в’язкості з урахуванням компонентного складу природного газу за тисків до 0,5 МПа обчислюють за формулою [8]:

 (2.21)

де *μ* виражено в мкПа·с;

*Т* – температура природного газу, К; *xN2*, *xCO2*– вміст азоту та двооксиду вуглецю, відповідно.

Формула для визначення числа Re (2.11) набуває вигляду:

 (2.22)

Отже, якщо брати до уваги і конструктивні особливості турбінки, і аеродинамічні властивості потоку робочого середовища, то коефіцієнт перетворення лічильника, який в даному випадку розглядався як відношення кутової швидкості обертання від об’ємної витрати можна подати наступним виразом:

 (2.23)

У розв’язанні прикладних задач часто використовують критерії подібності, для того, щоб повністю описати процес руху газового середовища. Вище уже згадувалося про критерій подібності, який характеризує перехід потоку від ламінарного до турбулентного – критерій Рейнольдса; також мова йшла і про сили аеродинамічного опору вимірного середовище, де опосередковано згадувалося про сили інерції. Оскільки, дослідженню підлягають турбінні лічильники газу, то число Рейнольдса доцільно рахувати по відношенню до геометричних параметрів лічильника, а не дослідної ділянки труби. Для цього скористаємося закордонними підходами для визначення числа Рейнольдса для турбінних лічильників газу.

Детальніше сили інерції розкриває критерій Струхаля [8]:

 (2.24)

де *f* – частота пульсацій потоку, Гц;

*L* – довжина хорди лопаті, м;

*v* – швидкість потоку, м/с.

Коли мова йде про властивість інерційності середовища та сили, що виникають під час нестаціонарного руху, то найкращим критерієм подібності тут є число Струхаля (2.24). Практичну цінність має виведене число Струхаля з урахуванням конструктивних особливостей для турбінних лічильників [11]:

 (2.25)

а також і число Рейнольдса[11]:

 (2.26)

де *d* – діаметр лопаті турбінки, м;

*Pf*–коефіцієнт заповнення лічильника.

Коли мова йде про природний газ, як робоче середовище турбінного лічильника, то приймаємо, що *Pf*= 1. Прирівнявши частоту пульсацій потоку за формулами (2.25) та (2.26) отримаємо:

 (2.27)

Одержаний вираз підставимо у залежність (2.23) і з урахуванням динамічної в’язкості (2.22) розпишемо коефіцієнт перетворення лічильника, виділивши не лише конструктивні особливості турбінки, а й параметри природного газу та властивості вимірного потоку:

 (2.28)

Отже, отримана залежність (2.28) характеризує коефіцієнт перетворення турбінного лічильника із врахуванням конструкції лічильника та параметрів природного газу і дозволяє оцінити нелінійність коефіцієнта перетворення відносно об’ємної витрати. Разом з тим, залежність (2.28) дозволяє коректувати систематичну складову похибки, оскільки враховує і геометричні параметри турбінки, і параметри вимірного середовища. Відповідно, якщо ввести в коректор правки на розрахунок коефіцієнта перетворення лічильника за формулою (2.28) при умові, що параметри моделі будуть уточнені експериментально при градуюванні турбінного лічильника, то таким чином можна коригувати систематичну складову сумарної похибки.



Рис.2.7 - Вплив геометричних розмірів турбіни на зміну коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу для труби з умовними діаметрами 80,100,150 мм

Результати моделювання впливу геометричних розмірів турбіни на співвідношення протидіючих і рушійних сил, які приводять до зміни коефіцієнту перетворення, наведені на рис.2.4. Вони можуть бути підставою для вибору на етапі проектування лічильника оптимальних геометричних параметри турбіни за критерієм мінімальної зміни відношення кутової швидкості обертання до об’ємної витрати.

Постає задача оцінювання випадкової складової похибки для внесення правок у алгоритм визначення похибки турбінного лічильника газу. З цією метою необхідно дослідити залежність формування виду закону розподілу на всьому діапазоні вимірювання досліджуваного турбінного лічильника. Із розглянутих в першому розділі методів ідентифікації закону розподілу перевага надається інформаційному методу на основі ентропійного коефіцієнта, оскільки він дає можливість оцінити не лише параметри нормального закону, але й основні види законів розподілу.

**РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ**

**3.1 Методика визначення коефіцієнта перетворення для корекції систематичної похибки турбінних лічильників газу**

Існуючі алгоритми опрацювання результатів метрологічних досліджень

турбінних лічильників газу на реальному середовищі спираються, в основному, на визначення коефіцієнту перетворення лічильника. Даний параметр є функцією від числа *Re*. На основі отриманих результатів досліджень в [11] пропонується розробити градуювальну таблицю, яка б дала змогу визначати коефіцієнт перетворення лічильника за заданими значеннями об’ємної витрати, тобто *K=f(qv)*. Перевагою такого підходу до визначення *К* було б врахування конструктивних параметрів турбіни, які пропонується уточнювати при градуюванні лічильника, та параметрів природного газу. Проте реалізацію підходу необхідно робити в умовах калібрування нових турбінних газових лічильників, коли надійність засобу вимірювання досягає свого максимального значення та виключений знос підшипників турбіни.

Для практичного втілення даного підходу при градуювання турбінного

лічильника необхідно уточнювати наступні параметри:

* кут нахилу лопаті (кут атаки), як основний параметр, від якого фізично залежить коефіцієнт перетворення лічильника, що видно із запропонованої моделівимірювання турбінними газовими лічильниками;
* зовнішній та внутрішній радіуси турбінки;
* площа поверхні леза лопаті;
* кількість лопатей турбінки;
* діаметр труби, на якій може бути встановлено турбінний лічильник;

Дана інформація залишається незмінною для будь яких умов проведення експерименту. Відповідно, для уточнених значень та паспортом газу за моделлю (2.18) визначають теоретичне значення коефіцієнту перетворення турбінного лічильника *Кі\_теор*на всьому діапазоні відтворюваних робочих витрат еталонного лічильника.

Оцінювання систематичної складової похибки еталонного лічильника відбувається за наступним алгоритмом:

Оцінювання систематичної складової похибки еталонного турбінного лічильника відбувається за наступним алгоритмом:

* оцінка абсолютного відхилення ∆іc між теоретичними значеннями номінального *Kі\_ном*та модельного *Кі\_мод* коефіцієнта перетворення лічильника *К* для *і*-го значення робочої витрати:

(3.1)

* поправка *δi* на значення систематичної складової похибки для *і*-го значення робочої витрати:

 (3.2)

* відносне значення систематичної похибки еталонного лічильника:

 (3.3)

де *Кі \_ експ* – експериментальне значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника отримане під час його калібрування;

* відносна похибка зумовлена дискретністю інформаційних імпульсів ∆імп з еталонного лічильника:

 (3.4)

де Nmin – мінімальна кількість імпульсів, що відповідає пропущеному контрольному об’єму при калібруванні лічильника;

* границі невилученої систематичної похибки еталонного лічильника із врахуванням границь основної допустимої похибки еталонної установки Δу:

 (3.5)

Такий алгоритм визначення невиключеної систематичної похибки турбінного лічильника дозволяє коригувати систематичну складову похибки турбінних лічильників газу на стадії проектування і калібрування.

**3.2 Дослідження закономірностей зміни ентропійного коефіцієнту при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників**

На основі результатів експериментальних досліджень наведених в [11] при застосування інформаційного підходу під час опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу була розроблена методика для оцінювання похибки лічильників.

Застосування інформаційного підходу передбачає використання ентропійного коефіцієнта як основного носія інформації про вимірювальний процес.

Критерієм належності кривої закону розподілу до того чи іншого сімейства розподілів є ентропійний коефіцієнт *k* [11, с. 81]:

 (3.6)

де - вибіркове ентропійне значення похибки;

*d* – ширина інтервалу вибіркового розподілу;

*nj* - частоти.

Для підвищення точності опрацювання результатів вимірювання об'ємної витрати на етапі калібрування (метрологічної атестації) в одній контрольній точці необхідно мати як мінімум 10 усереднених значень витрати для встановлення статистичної залежності між об’ємною витратою та ентропійним коефіцієнтом. У [11] наведена методика розрахунку значення ентропійного коефіцієнта при умові, що є можливість відтворити експеримент у фіксованій контрольній точці наступна:

* відтворити не менше як 10 дослідів для розрахунку усередненого значення об'ємної витрати;
* побудувати гістограму частот для отриманої вибірки з врахуванням того, що мінімальна кількість інтервалів розраховується за формулою [11, с. 73]:

(3.7)

* розрахувати ексцес вибірки;
* визначити значення ентропійного коефіцієнту за (3.6) та присвоїти відповідний закон розподілу, значення брати з [16];

Відповідно до наведеного алгоритму встановити значення ентропійного коефіцієнта у кожній контрольній точці. Побудувати залежність ентропійного коефіцієнта від об’ємної витрати. Рекомендується розбити криву залежності *k=f*(*qv*) на два інтервали: qmin..0,2qmax 0,2qmax..qmax. Відповідно до отриманих значень зробити висновки про вид закону розподілу похибки та розраховувати довірчі межі та невизначеність результатів вимірювання із врахуванням закону розподілу.

Такий підхід дозволяє з більшою достовірністю оцінювати випадкову складову похибки результатів вимірювання з врахуванням конкретного закону розполіду і робочої витрати через лічильник. Врахування виду закону розподілу результатів вимірювання турбінними лічильниками газу дає можливість підвищити оцінку точності шляхом уточнення діапазону зміни випадкової складової похибки результатів вимірювання об’єму за різних витратних режимів турбінних лічильників газу [11].

**3.3 Підвищення точності вимірювання турбінних лічильників на стадії калібрування**

Технічна можливість калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки в умовах, що максимально наближені до експлуатаційних, існує не завжди. Тому виникає потреба вибору між доступними альтернативами і плануванням проведення калібрування і повірки із пристосуванням до конкретних умов. Одним із варіантів вирішення поставленого завдання в процесі калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки є застосування теорії подібності газодинамічних процесів, що мають місце в проточній частині лічильника газу, враховуючи при цьому його конструктивні особливості, геометричні розміри та фізичні параметри плинного середовища.

Під час проведення калібрування лічильників великого діаметра часто доводиться звіряти його покази з показами двох чи більше еталонних лічильників меншого діаметра. При цьому для отримання результатів калібрування користуються умовою рівності сумарної об’ємної витрати еталонних лічильників та робочого засобу вимірювання, що калібрується. Таке припущення є помилковим для реального газового середовища [27]. Тому для

отримання коректних результатів необхідно користуватися умовою рівності не об’ємної, а масової витрати та основами теорії подібності, що визначаються чотирма моментами [28]:

* геометричною подібністю, тобто подібністю поверхонь взаємодії між моделями, що розглядаються, та середовищем;
* фізичною подібністю середовища, тобто подібністю полів та фізичних констант;
* подібністю граничних умов, що визначаються подібністю початкових та граничних умов;
* рівністю визначальних критеріїв.

Для турбінних лічильників, які широко використовують у процесі обліку природного газу, під час визначення критеріїв подібності центральне місце посідає характеристика режиму течії безпосередньо на профілі турбіни, яка є чутливим елементом лічильника. Збереження подібності передбачає рівність не тільки відносних однойменних фізичних величин в обох потоках, але й будь-яких безрозмірних комплексів, складених на їх основі.

Під час проведення аналізу розмірностей, а також для визначення динамічної подібності між різними експериментальними випадками руху потоку у задачах гідродинаміки використовують число Рейнольдса [17, с. 34].

Число Рейнольдса  – безрозмірне число, яке залежить від швидкості потоку газу, характерного лінійного розміру та властивостей газу [6]. Для газу з густиною *ρ* і динамічною в’язкістю *μ*, що протікає через поперечний переріз діаметром *D* зі швидкістю v, число Рейнольдса Re визначаємо таким чином:

 (3.8)

Концепція динамічної подібності визначає, що за умови рівних чисел Рейнольдса потоків тіло в них піддаватиметься аналогічним впливам середовища. У випадку з турбінним лічильником мова йде про однакову швидкість обертання турбіни в потоці. Для розрахунків як лінійний розмір для лічильників газу було прийнято гідравлічний діаметр *D*г проточної частини лічильника [27], який визначаємо за формулою:

 (3.9)

де *S*зм – площа поперечного перерізу потоку в проточній частині лічильника;

*P*зм – змочений периметр проточної частини лічильника.

Для визначення числа Рейнольдса на чутливому елементі турбінного лічильника акцент у дослідженні робили саме на перерізі турбіни. Відповідно до рівняння нерозривності потоку масова витрата за усталеного режиму руху плинного середовища є сталою величиною [27]:

 (3.10)

де *G*  – масова витрата плинного середовища через робочий засіб вимірювання;

Gі – масова витрата плинного середовища через *i*-тий еталонний лічильник;

*і* = 1, 2,…, *n*  – кількість еталонних ліній, що задіяні в процесі калібрування робочого засобу вимірювальної техніки.

Якщо взяти до уваги, що

 (3.11)

а:

 (3.12)

із (3.10) отримаємо рівність:

 (3.13)

Якщо прийняти, що калібрування відбувається з використанням одного і того ж середовища з однаковими параметрами температури і тиску, отже, обидві сторони рівності (3.13) можна скоротити на величину константи *μ*/4. Отримаємо вираз [17, с. 34]:

 (3.14)

Даний вираз являється базовим і описує умову коректної процедури калібрування робочих лічильників, які відрізняються від еталонних за типорозміром.

Для апробації цього виразу на конкретному прикладі було виконано розрахунки залежності параметра (Re·*P*зм) від витрати, заданої відповідно до паспортних даних різних моделей турбінних та ультразвукових лічильників. Розрахунки проводили для природного газу як робочого середовища калібрування при тиску 1 атм та температурі 0°С [17, с. 33]. Результати були представлено у вигляді графіків (рис.  3.1).



Рис 3.1- Залежність параметра (Re·*P*) від витрати (Q) для різних лічильників природного газу

Накладання графіків залежності (Re·*P*зм)=f(Q) в одну лінію констатує коректність умов подібності впливу середовища на робочі елементи проточної частини лічильника.

На іншому графіку (рис. 3.2) було представлено умови, за яких можливе проведення калібрування робочого засобу вимірювання техніки (ЗВТ) за допомогою двох еталонних лічильників. З рис. 3.2 видно, що у разі дотримання необхідних умов калібрування рівняння (3.14) виконується.

Додатково у було проведено розрахунок параметра (Re·*P*зм) для тиску 9 атм при температурі 5°С [17].



Рис 3.2 – Залежність параметра (Re·*P*)

Із результатів розрахунку наведених в [17] (див. рис. 3.2) дослідники зробили висновки, що у випадку калібрування робочого ЗВТ кількома еталонними лічильниками необхідно дотримуватися вимог умови (3.14). В іншому випадку зростає значення невизначеності вимірювання.

В Україні для повірки та калібрування лічильників газу використовують установки, які працюють на робочому середовищі – повітря, за тиску близького до атмосферного. Однак використання природного газу як робочого середовища забезпечує максимальне наближення умов калібрування до умов експлуатації лічильників. ПАТ «Івано-Франківськгаз» у калібрувальній лабораторії «Пасічна» має змогу проводити калібрування з використанням природного газу у діапазоні робочих тисків газу від 0,1 до 0,6 МПа. Калібрування на природному газі на високому тиску (до 5,5 МПа) в Україні можливе після введення Метрологічного центру Національної акціонерної компанії «Нафтогаз України» (м.  Боярка) в експлуатацію [17].

Більшість європейських калібрувальних стендів для лічильників, що працюють в умовах високого тиску, як робоче середовище використовують природний газ. Разом із тим у провідних метрологічних інститутах Європи та Канади є стенди, на яких як робоче середовище використовують повітря при високому тиску [17]. Аналіз роботи цих стендів показав їх ефективність та високі результати калібрування за умови коректного застосування теорії газодинамічної подібності.

Головною відмінністю між повітрям та природним газом є в’язкість середовища та його густина. Значення відношення Reповітря / Reпр. газу показує, що при атмосферному тиску за однакової швидкості потоку значення числа Рейнольдса повітря на 11,5 % вище, ніж природного газу. Зі зростанням тиску відмінність між повітрям та природним газом зменшується. Розглядаючи значення числа Рейнольдса для різних калібрувальних середовищ за рівних тисків калібрування, можемо дійти висновку, наскільки вони, а відтак, і покази лічильника, калібровані на природному газі або повітрі без дотримання умови подібності, будуть різнитися [17].



Рис. 3.3 – Залежність числа Рейнольдса від тиску за сталої витрати Q=1000 м3/год через турбінний лічильник (DN200) для різних робочих середовищ

Ця особливість турбінних лічильників знайшла своє відображення в міжнародних нормативних документах, де суворо регламентуються умови, за яких відбувається калібрування лічильників цього типу. Лічильники мають бути перевірені за параметрів газового середовища, максимально наближених до умов експлуатації (тиск, температура, тип газу) лічильника після його введення в експлуатацію.

На основі проведених експериментів наведених в [17] іноземні науковці констатували факти:

 • експлуатаційні характеристики турбінних лічильників змінюються зі зміною витрати та робочого тиску. Ці зміни пов’язані зі зміною значення числа Рейнольдса, а в деяких випадках і густини та особливо важливі при низьких і перехідних робочих тисках і витратах;

• калібрування лічильника, проведене на випробувальному стенді в певному діапазоні чисел Рейнольдса, характеризує експлуатаційні параметри лічильника, якщо він використовується для вимірювання кількості газу в тому ж діапазоні чисел Рейнольдса;

• очікуваний робочий діапазон числа Рейнольдса та/або густини для лічильника необхідно враховувати під час розробки програми калібрування» [17].

З метою визначення залежності впливу величини тиску на число Рейнольдса для різних плинних середовищ в [17] розроблено методику проведення розрахунків числа Рейнольдса залежно від фізичних параметрів плинного середовища для різних значень витрат. Цей розрахунок дає змогу простежити зміну робочого тиску для заданої витрати під час калібрування лічильників на різних робочих середовищах, а саме: природному газі з різним компонентним складом, повітрі або метані, за умови сталого числа Ренольдса (рис. 3.3).

Під час проведення процедури калібрування вкрай важливо враховувати фізичні параметри та склад робочого середовища. За умови додержання принципів газодинамічної подібності однакове значення витрати для різних типів газів досягається за різних тисків [17, с. 36 ].

На основі інформації наведеної в [17] можна зробити висновки: калібрування або повірку лічильників газу можна проводити на робочому середовищі, відмінному від середовища його експлуатації, за умови газодинамічної подібності (однакових значень числа Рейнольдса). Цього можна досягти шляхом варіації величини тиску робочого середовища калібрування за сталої або однакової витрати. Для отримання коректних результатів калібрування робочого засобу вимірювання з геометричними розмірами, що відрізняються від розмірів еталонних лічильників, необхідно користуватися умовою рівності сумарної масової витрати (закон збереження маси для усталеного режиму руху реального газу) та умовами газодинамічної теорії подібності (3.14). Виконуючи ці умови можна досягти підвищення точності вимірювання турбінних лічильників газу на стадії калібрування.

**ВИСНОВКИ**

На основі теоретичних досліджень було досліджено метрологічні характеристики турбінних лічильників газу, а також описано їх будову, параметри і роботу за призначенням, наведений аналіз алгоритму опрацювання результатів вимірювань при метрологічних дослідженнях турбінних лічильників газу. Представлена графічна модель - причинно-наслідкова діаграма (діаграма Ісікави), на якій показано визначення причин відхилення реальної кутової швидкості обертання турбінного лічильника газу від ідеальної, а також математична модель функціонування турбінних лічильників.

У третьому розділі представлені методи удосконалення точності вимірювання об’єму газу турбінними лічильниками. Запропонована методика визначення коефіцієнта перетворення для корекції систематичної похибки, а також запропонований метод підвищення точності вимірювання турбінних лічильників на основі застосування газодинамічної теорії подібності в процесі калібрування та повірки лічильників.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення.

2. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости: ГОСТ 30319.2-96. – [Введен с 1997-07-01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 54 с. – (Межгосударственный стандарт).

3. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об’єму та об’ємної витрати газу: ДСТУ 3383: 2007.– [Чинний від 2007-07-01; на заміну ДСТУ 3383-96].– К.: Держспоживстандарт України, 2007. – ІІІ, 9 с. – (Національний стандарт України).

4. Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови (EN 12261:2002, IDT): ДСТУ EN 12261:2006. – [Чинний від 2007-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – V, 33 с. – (Національний стандарт України).

5. МИ 1317-2004. ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

6. Андріїшин М.П. Газ природний, палива та оливи: мо- нографія / М.П. Андріїшин, Я.С. Марчук, С.В. Бойченко, Л.А. Рябоконь. – Одеса: Астропринт, 2010. – 232 с.

7. Бошняк Л.Л. Тахометрические расходомеры / Л.Л. Бошняк, Л.Н. Бызов – Л.: Машиностроение, 1968 – 212 с.

8. Вимірювання витрати та кількості газу: довідник / [М.П.Андріїшин, С.О.Канєвський, О.М.Карпаш, Я.С.Марчук, І.С.Петришин, А.А.Руднік, О.Є.Середюк, С.А.Чеховський]; за ред. О.М.Карпаша. – Івано-Франківськ: ПП

«Сімик», 2004. – 160 с.

9. Долішня Н.Б. Підвищення точності опосередкованого вимірювання витрати газу з урахуванням властивостей потоку та фізичних основ роботи турбінних лічильників/ Н.Б. Долішня, Л.А. Витвицька, Н.М. Піндус // Електротехнічні та комп’ютерні системи. – 2012. – No 06(82). – С.198-204.

10. Електричні вимірювання електричних і неелектричних величин / За ред. Є. С. Поліщука. — К.: Вища школа, 1978. — 351 с.

11. Клочко Н.Б., Вдосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників газу - Івано-Франківськ : Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 2014 .

12. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник: Кн.1 / П.П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.

13. Лічильники газу турбінні ЛГ-К-Ех, Настанова з експлуатації Фб2.784.008 НЕ

14. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч.посіб. для студ. вищих навч. закл./ Є.Т.Володарський, В.В.Кухарчук, В.О.Поджаренко, Г.Б.Сердюк. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.

15. 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

16. Новицький П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П.В. Новицький, И.А. Зограф – Л.: Энергоатомиздат, 2001. – 303 с.

17. Особливості застосування газодинамічної теорії подібності в процесі калібрування та повірки лічильників природного газу / М. П. Андріїшин, О. М. Чернишенко, А. В. Едель// [Нафтогазова галузь України](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=JUU_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=IJ=&S21COLORTERMS=1&S21STR=EJ000095). - 2015. - № 6. - С. 33-36.

18. Петришин І.С. Аналіз комплексного показника якості турбінних лічильників газу/ І.С. Петришин, Д.О. Середюк // Матеріали третьої науково-технічної конференції "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи": Збірка наукових праць. – Київ, 2004. – С.242

19. Петришин І.С. Науково-методологічні та технічні засади забезпечення точності вимірювань витрати природного газу: дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.11.01 /Петришин Ігор Степанович . – Львів, 2007. – 380 с.

20. Петришин І.С. Особливості повірки лічильників газу при робочих умовах / І.С. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Вимірювання витрати та кількості газу: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2005. – с. 22.

21. Пістун Є.П. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску / Є.П. Пістун, Л.В. Лесовой – Львів: Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006.– 576 с.

22. Плотников В.М. Приборы и средства учета природного газа и конденсата/ В.М. Плотников, В.А. Подрешетников, Л.Н. Тетеревятников – Л.: Недра, 1989. – 238с.

23. Предпосылки процесса гармонизации в Европе единицы обьема природного газа под високим давлением / Д. Допхайде, Б. Миккан, Крамер, М. П. ван дер Бек. // Український метрологічний журнал. – 2004. – Вип. 2. – С. 29-36.

24. Стухляк П. Д., Іванченко О. В., Букетов А. В., Долгов М. А. Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація): навчальний посібник. — Херсон: Айлант, 2011. — 371 с.

25. Счетчик газа турбинный TRZ, Руководство по эксплуатации ЛГТИ.407221.007РЭ

26. Цюцюра В.Д., Цюцюра С.В. Метрологія та основи вимірювань. Навч. посібн., К., "Знання -Прес", 2003

27. Чарный И.А.  Основы газовой динамики  / И.А.Чар- ный. – М.: «Гостоптехиздат», 1961. – 221 с.

28. Шнеэ Я.И. Газовые турбины. Ч.1. Термодинамические процессы и теплообмен в конструкциях  / Я.И.Шнеэ, В.М.  Капинос, И.В.  Котляр.  – К.: Вища школа, 1979.  – 296 с.