

## Відгук

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Коробка І.В.  
на дисертацію **Костика Ігоря Володимировича**

### ***„Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку“***,

яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.11.01 – прилади і методи вимірювання механічних  
величин

#### **Актуальність теми дисертації**

В умовах дефіциту та зростання вартості енергетичних ресурсів проблема їх ефективного використання у всіх галузях промисловості та в побуті для України є надзвичайно важливою. Під час транспортування газофазних середовищ трубопроводами внаслідок роботи технологічного обладнання, а також внаслідок впливу елементів конструкції вузла вимірювання, газодинамічна структура потоку змінюється. Зміни структури можуть бути зумовлені динамічними режимами плинину середовища, а також спотвореннями структури потоку внаслідок впливу елементів конструкції вимірювальної ділянки трубопроводу. Однак, незалежно від причини виникнення цих змін структури потоку, вони впливають на точність реєстрації його витрати. Тому на даний час існує необхідність в дослідженнях додаткових похибок, що виникають під час вимірювання витрати газоподібних середовищ із деформованою структурою потоку.

Дисертаційна робота Костика І.В. якраз і присвячена дослідженню вище зазначених науково-технічних проблем, вирішення яких сприятиме підвищенню точності вимірювання витрати та кількості газофазних середовищ, які за правило мають змінну газодинамічну картину потоку.

Таким чином, дисертаційна робота Ігоря Костика є на часі і її актуальність є незаперечною.

**Наукова новизна.** В результаті виконаних досліджень дисертаційної роботи було отримано такі найбільш суттєві наукові результати:

- узагальнено та класифіковано фактори, які призводять до виникнення додаткових складових невизначеності вимірюваного значення витрати газоподібного середовища в умовах нестационарного потоку методом змінного перепаду тиску, а також запропоновано нові підходи для оцінювання цих складових;

- отримано нову математичну модель пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску, яка надає можливість здійснювати дослідження зміни тиску в камері перетворювача тиску та перепаду тиску за умов нестационарного потоку газоподібного середовища;

- отримано нові аналітичні залежності розрахунків додаткової невизначеності коефіцієнта витікання звужувального пристрою, яка виникає внаслідок впливу виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу вузла обліку. Отримані залежності дозволяють здійснювати кількісну оцінку цієї складової невизначеності, тим самим підвищуючи точність вимірювання витрати;

- удосконалено рівняння комбінованої невизначеності вимірюваного значення витрати газоподібного середовища методом змінного перепаду тиску шляхом введення до рівняння додаткових складових, які зумовлені нестационарністю потоку вимірюваного середовища, а також впливом виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу. Застосування даного удосконаленого рівняння дозволяє підвищити точність вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску в умовах змінної газодинамічної структури потоку.

### **Практична цінність**

Практичне значення отриманих в роботі результатів полягає в наступному:

- удосконалено методику оцінювання додаткової складової невизначеності вимірювання витрати газоподібного середовища, яка виникає внаслідок впливу нестационарності потоку;

- уточнено аналітичні залежності, які дозволяють визначити резонансні частоти системи «імпульсна трубка – камера перетворювача», на основі математичної моделі пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску, розроблено рекомендації для уникнення резонансних явищ у пневматичному каналі;

- розроблено експериментальну установку для дослідження динамічних характеристик пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску та перепаду тиску, на базі якої досліджено динамічні характеристики пневматичного каналу з використанням вимірювального перетворювача тиску ППС.З-РН;

- розроблено експериментальну установку для дослідження впливу параметрів конструкції, характеристик вимірювального трубопроводу на точність реєстрації витрати методом змінного перепаду тиску;

- розроблено методику оцінювання додаткової невизначеності коефіцієнта витікання звужувального пристрою, яка зумовлена впливом виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу;

- розроблено рекомендаційні заходи, що дозволяють зменшити додаткові складові невизначеності, які виникають в умовах потоків зі змінною газодинамічною структурою, тим самим підвищити точність вимірювання витрати таких потоків.

Отримані у дисертаційній роботі наукові результати застосовуються у навчальному процесі кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету "Львівська політехніка" при підготовці фахівців за спеціальністю 151 „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології“.

**Зв'язок дисертаційної роботи з державними науковими програмами, планами, темами, пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки.**

Дисертаційна робота виконувалася згідно тематичних планів проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт Національного університету „Львівська політехніка“ при виконанні держбюджетних госпдоговірних науково-дослідних робіт, які фінансувались із державного бюджету та госпрозрахункових коштів.

Як впливає з поданих в дисертації даних Костик І.В. був безпосереднім виконавцем цих робіт.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації та достовірність отриманих результатів**

Обґрунтованість наукових положень висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, забезпечується коректністю постановки і вирішення завдань дослідження, достатньо чітким формулюванням мети і вибором методів досліджень, використанням широко апробованих методів теорії опрацювання сигналів, фундаментальних положень математичного аналізу та фізики, гідрогазодинаміки, теорії похибок та теорії невизначеності, методів планування і постановки експерименту, а також результатами теоретичних та експериментальних досліджень і випробувань.

Отримані автором наукові результати у відповідності до поставлених задач досліджень є логічними, не суперечать фундаментальним фізичним та математичним закономірностям і також підтверджуються достатньою апробацією основних положень та висновків на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях та семінарах.

*Достовірність* отриманих в роботі положень і наукових результатів підтверджується результатами проведених досліджень, коректністю застосування припущень і формулювання умов досліджень при моделюванні процесів у витратомірних установках та адекватністю результатів математичного та фізичного моделювання і експериментальних досліджень.

## **Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих працях. Впровадження результатів дослідження**

Основні положення та результати дисертаційної роботи викладені у 17 наукових працях, а саме: 4 статті у фахових наукових журналах України, 1 стаття у закордонному виданні, що входить до міжнародної науково-метричної бази Index Copernicus International, 12 публікації у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, які розкривають суть розв'язуваних наукових задач.

Результати дисертації впроваджено та застосовано в різних організаціях, а також у навчальному процесі.

Все це додатково підтверджує практичну цінність роботи.

## **Структура та зміст дисертаційної роботи**

В цілому дисертаційна є завершеним науковим дослідженням і складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Матеріали дисертації викладено на 173 сторінках, із них 147 сторінок основної частини, 32 ілюстрації, 23 таблиці, 89 найменувань використаних літературних джерел та 5 додатків на 25 сторінках.

Зміст дисертаційної роботи відповідає паспорту спеціальності 05.11.01 – прилади і методи вимірювання механічних величин, за якою вона подана до захисту.

**У вступі** наведено загальну характеристику роботи, окреслено проблему та обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету, об'єкт та предмет дослідження, висвітлено наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок здобувача в отриманні результати, подано відомості про їх апробацію, публікацію та впровадження.

**Перший розділ** направлено на аналіз існуючого стану науково-технічного забезпечення вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку. При цьому зроблено акцент на аналізі досліджень впливу нестационарності потоку вимірюваного середовища, а також параметрів конструкції вузлів обліку на точність вимірювання витрати. Сформульовано основні напрями дисертаційного дослідження.

**У другому розділі** подано теоретичні та методологічні основи оцінки впливу нестационарності потоку газоподібного середовища на точність вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску.

Зокрема наведено перелік режимів плинку середовища та їх характеристики, узагальнено та класифіковано причини появи нестационарності потоку, введено класифікацію факторів виникнення

додаткових невизначеностей при вимірюванні витрати газоподібних середовищ в умовах нестаціонарного потоку.

Слід відзначити, що другий розділ дисертації є важливим і містить матеріали, які застосовано у наступних розділах під час дослідження впливу нестаціонарності потоку на точність вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску.

**Третій розділ** присвячений моделюванню та дослідженню витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестаціонарності потоку газоподібного середовища.

У розділі представлено розроблену здобувачем математичну модель пневматичного каналу вимірювального перетворювача тиску чи перепаду тиску; спроектовано експериментальну установку для дослідження динамічних характеристик пневматичного каналу перетворювача тиску; наведені результати низки експериментальних досліджень, які підтверджують адекватність розробленої математичної моделі.

Виконано дослідження впливу резонансу на вимірюване значення тиску (перепаду тиску), для чого лінеаризовано розроблену математичну модель пневматичного каналу та отримано її передавальну функцію. За результатами моделювання встановлено, що резонанс вкрай негативно впливає на точність вимірювання, зокрема, за умови рівності власних частот системи і частоти пульсації потоку, значення вимірюваного параметру може бути завищене в десятки разів. Для уникнення та усунення резонансу у пневматичному каналі вимірювального перетворювача тиску (перепаду тиску), сформовано рекомендації, які необхідно враховувати під час проектування системи вимірювання витрати.

Для кількісного оцінювання невизначеностей, які виникають внаслідок нестаціонарності потоку, проведено дослідження додаткових їх складових, під час яких уточнено методику оцінювання невизначеності, яка виникає внаслідок відсутності інерційної складової у підкореному виразі квазістаціонарного рівняння витрати. Ця методика передбачає знаходження частотного спектру сигналу за перепадом тиску на звужувальному пристрої з використанням методу швидкого перетворення Фур'є, на основі якого визначається амплітуда і частота гармонік для обчислення коефіцієнтів інерції та гармонічних спотворень вимірюваного сигналу, які є складовими при обчисленні вищезгаданої невизначеності. Застосувавши дану методику та провівши порівняння отриманих результатів оцінювання невизначеності із результатами інших дослідників, підтверджено коректність вищезгаданої розробленої методики, а також встановлено, що невизначеність, яка виникає внаслідок відсутності інерційної складової у підкореному виразі квазістаціонарного рівняння витрати суттєво залежить від середньоквадратичної амплітуди пульсацій вимірюваного сигналу.

За результатами оцінювання складових невизначеностей, які виникають внаслідок нелінійної залежності витрати від перепаду тиску, а також внаслідок відсутності інерційної складової у підкореновому виразі квазістаціонарного рівняння витрати, встановлено, що внаслідок впливу нестационарності вимірювального потоку, сумарна додаткова невизначеність вимірювання витрати може сягати до 0,5%.

**В четвертому розділі** досліджено вплив параметрів елементів конструкції вимірювального трубопроводу на точність реєстрації витрати методом змінного перепаду тиску, зокрема впливу невісесиметричності елементів внутрішньої порожнини вимірювального трубопроводу.

Для даних оцінювання такого впливу розроблено витратовимірювальну установку, розроблено методику виконання та опрацювання результатів експериментальних досліджень додаткової невизначеності коефіцієнта витікання діафрагми, зумовленої наявністю концентричних виступів перед діафрагмою на відстані 2DN, 5DN та 10DN.

На основі опрацювання отриманих масивів експериментальних даних, згідно розробленої методики, здобувачем отримано нові аналітичні залежності абсолютної величини відхилення коефіцієнта витікання діафрагми, яка виникає внаслідок впливу виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу залежно від відстані до стандартної діафрагми, а також геометричних розмірів концентричних виступів у внутрішню порожнину вимірювальної камери.

Застосовуючи розроблені нові аналітичні залежності, дисертантом запропоновано аналітичну залежність, яка дозволяє здійснювати кількісну оцінку відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання, що виникає внаслідок наявності виступу у внутрішню порожнину вимірювальної камери перед діафрагмою. Також сформовано рекомендації для визначення та усунення даної невизначеності за різних геометричних значеннях параметрів вимірювального трубопроводу.

Результати, представлені у четвертому розділі дисертаційної роботи, мають науковий і практичний інтерес, оскільки дозволяють здійснювати кількісну оцінку впливу виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу на точність вимірювання витрати газоподібного середовища.

**П'ятий розділ** направлено на розроблення рекомендацій, які необхідно враховувати під час вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку методом змінного перепаду тиску. Зокрема удосконалено рівняння комбінованої невизначеності вимірювання витрати шляхом введенням додаткових складових, які враховуватимуть вплив нестационарності потоку, а також виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу; наведено рекомендації, які необхідно брати до уваги при проектуванні систем

вимірювання витрати з метою уникнення явища резонансу у пневматичних каналах вимірювальних перетворювачів тиску та перепаду тиску.

Запропоновані рекомендації дають змогу підвищити точність вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку.

Завершують дисертаційну роботу **висновки, список літературних джерел**, на які є посилання в роботі, та **додатки**.

В додатках наведено протоколи відповідності геометричних розмірів, та паспорти окремих елементів експериментальної витратовимірювальної установки; результати експериментальних досліджень впливу виступів у внутрішню порожнину вимірювального трубопроводу на коефіцієнт витікання стандартної діафрагми; документи, які підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

### **Відповідність автореферату змісту дисертації.**

Автореферат в загальному написаний відповідно до вимог, які встановлені відповідними нормативними документами та положеннями до авторефератів. Він містить всі необхідні складові структурної побудови і в ньому викладена основна суть виконаних наукових досліджень, а також наведені висновки та список основних публікацій. В цілому зміст автореферату дисертації адекватно відображає основну суть виконаної роботи.

### **По змісту дисертації та автореферату є такі зауваження:**

1. В розділі 1 дисертаційної роботи недостатньо уваги приділено розгляду впливу місцевих (локальних) опорів вимірювального трубопроводу на точність вимірювання витрати газоподібних середовищ методом змінного перепаду тиску, хоча відомо, що такий вплив може бути значним.

2. В розділі 2 автором наведено рівняння (2.34) для обчислення невизначеності, яка виникає внаслідок впливу частоти дискретизації сигналів вимірюваних параметрів. У розділі 3 автор стверджує, що ця невизначеність є незначною і нею можна знехтувати. Однак для підтвердження цього висновку автору слід було б застосувати рівняння (2.34) та кількісно оцінити дану складову невизначеності для умов експлуатації діючих вимірювальних систем;

3. В розділі 3 для реалізації математичної моделі пневматичного каналу (3.21) вимірювального перетворювача тиску (перепаду тиску) необхідно розраховувати значення густини газу у пневматичному каналі. В дисертації автором не вказано, які саме методи чи рівняння стану застосовані для обчислення густини, та яка точність цих рівнянь;

4. В розділі 3 під час дослідження додаткової складової невизначеності впливу місцевого прискорення, яка пов'язана з відсутністю інерційної складової у підкореновому виразі квазістаціонарного рівняння, слід було б приділити увагу обґрунтуванню вибору методу для отримання частотного спектру вимірюваного сигналу перепаду тиску.

5. В розділі 3 зроблено висновок щодо адекватності математичної моделі на підставі оцінювання максимального відносного відхилення. Слід було застосувати статистичні методи оцінювання адекватності із використанням критеріїв Фішера і Стьюдента.

6. В розділі 4 на рисунку 4.8 наведено графіки залежностей відхилення коефіцієнта витікання стандартної діафрагми від числа Рейнольдса для обмеженого діапазону числа Рейнольдса (від  $0,9 \cdot 10^4$  до  $1,8 \cdot 10^5$ ), на основі чого зроблено висновок про те що ці залежності близькі до лінійних. Автору слід було б обґрунтувати цей висновок для чисел Рейнольдса більших від верхньої межі досліджуваного діапазону, оскільки такі числа Рейнольдса можуть виникати під час експлуатації системи вимірювання.

7. Під час досліджень бажано було б застосувати сучасні можливості віртуального моделювання взаємодії потоку вимірюваного середовища із елементами конструкції приладів, наприклад програмний пакет Ansys. Це надало б можливість більш ефективно оцінити величину впливу асиметричності потоку на метрологічні характеристики засобу вимірювання витрати і кількості газофазних середовищ за різних умов і діапазонів виміру.

8. У роботі вжито окремі технічні жаргони, а саме: «функція передачі» замість «передавальна функція» (стор. 86, 107); «поправочний коефіцієнт» замість «поправковий коефіцієнт» (стор. 55, 56); «коефіцієнт передачі» замість «передавальний коефіцієнт» (стор. 81).

9. При проведенні досліджень не здійснено захист інтелектуальної власності, відсутні патенти на винахід, що значно підсилило б практичну цінність дисертаційної роботи.

10. При наведенні списку літературних джерел є відхилення від вимог відповідних стандартів, частина формул написана курсивом а частина просто без нього.

Однак, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, вони мають локальний характер і не стосуються основних положень, що виносяться на захист.

Слід окремо відзначити, що дисертація написана доброю технічною українською мовою та оформлена відповідно до діючих вимог. Робота добре ілюстрована і надто не перевантажена зайвим матеріалом.

## **Висновки**



Дисертаційна робота **Костика І.В.** „Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку“, є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати у галузі вимірювання витрати та кількості енергоносіїв, що у сукупності вирішують важливу наукову проблему підвищення точності вимірювання витрати газоподібних середовищ.

Дисертаційна робота **Костика І.В.** відповідає науковому рівню робіт, що подаються до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. За актуальністю, науковим рівнем розробок та їх практичним втіленням, наявністю необхідної кількості та обсягу публікацій дисертаційна робота „Вимірювання витрати газоподібних середовищ із змінною газодинамічною структурою потоку“, відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 “Порядку присудження наукових ступенів” затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а її автор – **Костик Ігор Володимирович** заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади і методи вимірювання механічних величин.

*Офіційний опонент, директор  
Інституту аерокосмічних технологій  
Київського політехнічного  
інституту ім. Ігоря Сікорського”,  
доктор технічних наук, професор*

*Іван КОРОБКО*

*Підпис доктора технічних наук,  
професора Івана Коробка засвідчую  
Вчений секретар Вченої ради  
Київського політехнічного  
інституту ім. Ігоря Сікорського”,  
кандидат технічних наук, доцент*



*Валерія ХОЛЯВКО*