

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Горбійчука М.І.
на дисертацію Биць Оксани Михайлівни

“Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії
на основі витратомірів змінного перепаду тиску”,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

Актуальність теми дисертації

На сьогоднішній день у всьому світі і, в Україні зокрема, велика увага приділяється питанням енергозбереження в галузі теплопостачання. Налагодження точного обліку теплової енергії є необхідною умовою для її ефективного та економного використання, а також дає змогу виявити недоліки теплогенеруючих об’єктів і теплових мереж та усунути їх.

Сучасні системи вимірювання дозволяють реалізувати вимірювання кількості теплової енергії в реальному часі з урахуванням теплофізичних параметрів теплоносія. Залежно від потужності та структури мережі теплопостачання такі системи можуть мати різноманітну структуру і як наслідок різні алгоритми обчислення кількості теплової енергії.

Для реалізації алгоритмів обчислення кількості теплової енергії необхідно мати математичні моделі процесу її вимірювання та обмеження застосування таких моделей. На сьогодні у відомих джерелах відсутні, зокрема, рівняння обчислення окремих теплофізичних властивостей теплоносія (показника адіабати); рівняння обчислення невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії. Тому виникає потреба у розробленні математичних моделей систем вимірювання кількості теплової енергії і, на їх основі, теоретичної бази проектування таких систем.

У вітчизняній промисловості в складі систем вимірювання кількості теплової енергії у трубопроводах великих діаметрів часто застосовують витратоміри змінного перепаду тиску. Суттєвою перевагою цих витратомірів є простота реалізації первинного перетворювача витрати, стандартизація технічних вимог та способів виконання вимірювань. Проте, під час проектування систем вимірювання на основі витратомірів змінного перепаду тиску, необхідно виконати значну кількість вимог та обмежень, щодо застосування таких витратомірів. Внаслідок цього, процедура проектування таких систем вимірювання є складною та потребує автоматизації.

Впровадження програмних пакетів для автоматизації процесів проектування забезпечує підвищення точності розрахунків, якість проектної документації, а також дозволяє скоротити процес проектування.

Отже, завдання автоматизації процесу проектування та розроблення програмного пакету для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску, які вирішуються у цій роботі, є актуальними.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка». Робота пов'язана з виконанням держбюджетної науково-дослідної роботи ДБ "Енергія" щодо розроблення системи автоматизованого проектування пристроїв вимірювання кількості природного газу в одиницях об'єму та енергії, а також з виконанням госпдоговірних науково-дослідних робіт та кафедральної тематики «Дослідження складових невизначеності витрати середовища з врахуванням шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу».

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Робота викладена на 138 сторінках, у тому числі, рисунків – 41, таблиць – 22, додатків – 4 на 10 аркушах. Бібліографія включає 87 джерел та викладена на 9 аркушах. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 175 сторінок.

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, показано зв'язок дисертації з науковими програмами та планами університету, де виконана робота, визначено об'єкт та предмет досліджень, наукову новизну, практичну цінність та особистий внесок здобувача в одержаних результатах, наведено відомості про їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** автором проведений аналіз нормативного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії та процесу їх проектування. Зокрема, відзначено актуальність розроблення затвердженої у встановленому порядку методики визначення кількості теплової енергії та методики оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості, що є

необхідною умовою для організації точного комерційного обліку теплової енергії.

Опрацьовано нормативні документи, які визначають вимоги до лічильників теплової енергії. Зазначено, що важливою складовою системи вимірювання кількості теплової енергії є вимірювальні перетворювачі витрати (витратоміри).

Розглянуто переваги і недоліки витратомірів змінного перепаду тиску та обґрунтовано складність їх проектування у зв'язку з необхідністю врахування великої кількості вимог і обмежень до конструктивних характеристик елементів витратоміра, складністю методів обчислення параметрів теплоносія, виконанням ітераційних розрахунків витрати. Вказано на необхідність автоматизації процесу проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

У другому розділі автором проаналізовано можливі структури систем вимірювання кількості теплової енергії. Розглянуто рівняння для визначення кількості теплової енергії для типових систем вимірювання на джерелах теплової енергії та в схемах тепlopостачання споживачів. Сформовано узагальнене рівняння обчислення кількості теплової енергії, що враховує кількість трубопроводів подачі, зворотних трубопроводів, трубопроводів підживлення та може бути застосоване як для закритих так і для відкритих систем тепlopостачання.

Автором визначено набір функцій, які є необхідними для формування та зручного представлення вимірюваного значення кількості теплової енергії і які, незалежно від структури, має реалізувати система вимірювання кількості теплової енергії.

Вперше розроблено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії на основі повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь визначення кількості теплової енергії та рівнянь визначення властивостей теплоносія.

Розроблено алгоритми автоматизованого розрахунку кількості теплової енергії для систем із застосуванням витратомірів змінного перепаду тиску, який реалізований у САПР "Теплова енергія".

Розроблено рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії із врахуванням невизначеностей усіх параметрів, що входять до рівняння обчислення кількості теплової енергії.

У третьому розділі представлено результати аналізу існуючих методик розрахунку термодинамічних властивостей води, водяної пари за результатами

якого визначено методи, які доцільно застосовувати для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

На основі термодинамічних залежностей і рівнянь IAPWS-IF97 розроблено рівняння розрахунку точних значень показника адіабати. За результатами опрацювання цього рівняння розроблено спрощений алгоритм для розрахунку показника адіабати перегрітої пари для тиску пари від лінії насичення до 100МПа та температури від 97°C до 800°C. Виконано перевірку розробленого спрощеного рівняння шляхом порівняння результатів обчислення показника адіабати за спрощеним рівнянням із зразковими значеннями, отриманими за рівняннями IAPWS-IF97. Встановлено, що методична похибка розрахунку значень показника адіабати за спрощеним рівнянням у вказаних діапазонах тиску та температури пари не перевищує 2,62 %.

Розроблено спрощені аналітичні залежності для обчислення відносних коефіцієнтів чутливості невизначеності ентальпії до невизначеності результатів вимірювання тиску та температури води. Розроблена спрощена методика оцінювання невизначеності ентальпії води (водяної пари) може бути застосована під час автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Четвертий розділ присвячено висвітленню основних результатів розроблення системи автоматизованого проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії, у складі яких застосовують витратоміри зі стандартними звужувальними пристроями потоку.

Запропоновано та реалізовано нові алгоритми щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, які дають змогу реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням обмежень стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009.

Представлено основні характеристики підсистеми введення та перевірки коректності вхідних даних. Реалізовані вікна у програмному середовищі C++ САПР для введення характеристик засобів вимірювань тиску, перепаду тиску, температури, що входять до складу системи вимірювання кількості теплової енергії; вікон введення характеристик вимірювального трубопроводу витратоміра; вікон, які містять повідомлення для сповіщення користувача про помилки допущені під час введення вхідних даних, а також для усунення недоліків проектування.

Удосконалено алгоритм для автоматизованого проектування та розрахунку параметрів витратоміра змінного перепаду тиску, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати та кількості середовища з

врахуванням заданого значення допустимої втрати тиску на звужувальному пристрої.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.

Наукову цінність мають такі результати дисертаційної роботи:

- 1) удосконалено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, що дає можливість дослідити вплив конструктивних характеристик витратоміра, параметрів теплоносія на результат вимірювання кількості теплової енергії;
- 2) вперше отримано рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії, що дає можливість автоматизувати процес оцінювання невизначеності із врахуванням впливу невизначеностей характеристик засобів вимірювання та параметрів теплоносія;
- 3) вперше розроблені аналітичні залежності для обчислення показника адіабати перегрітої водяної пари, що в сукупності з відомими рівняннями густини дає можливість обчислити параметри стану водяної пари під час вимірювання її витрати методом змінного перепаду тиску;
- 4) знайшов подальший розвиток метод автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, які дають змогу реалізувати проектування таких систем з врахуванням експертних рекомендацій, автоматично сформованих під час проектування, та досягнути необхідної невизначеності (точності) вимірювальної системи та її відповідності діючим стандартам.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає у розробленні програмного комплексу САПР "Теплова енергія" для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, в складі яких для вимірювання витрати теплоносія застосовують витратоміри змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями. Застосування цього програмного комплексу дає змогу автоматизувати проектування нових систем, а також перевірення метрологічних характеристик діючих систем вимірювання кількості теплової енергії.

Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації та достовірність отриманих результатів

Обґрунтованість наукових положень дисертації забезпечена коректністю постановки і вирішення завдань дослідження, чітким формулюванням мети і вибором методів досліджень. Для отримання основних наукових результатів

застосовано класичні методи досліджень, зокрема, математичної статистики, теорії оптимізації, теорії похибок та теорії невизначеності, методи термодинаміки для аналізу стану теплоносія. Адекватність отриманих в роботі математичних моделей і рівнянь перевірена шляхом порівняння з результатами відомих достовірних джерел.

Повнота викладу матеріалів дисертації в наукових публікаціях, захищених за темою дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 14 наукових публікаціях, з них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у виданнях, включених до наукометричних баз даних, які водночас належать до переліку наукових фахових видань України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави та 8 праць апробаційного характеру.

Основні отримані у дисертаційному дослідженні результати представлені у наукових публікаціях та апробовані на науково-технічних конференціях. Особистий внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, є визначальним.

Відсутність порушення академічної доброчесності

За результатами перевірки дисертаційної роботи та публікацій не виявлено ознак академічного плагіату, елементів фабрикації та фальсифікації. Автором застосовано посилання на його наукові публікації, публікації інших авторів, нормативні документи та інші джерела. У дисертаційній роботі відсутні порушення академічної доброчесності.

До недоліків дисертації слід віднести:

1. При формуванні наукової новизни слід було вказати, які окремі положення отримані «вперше», «удосконалені» або «знайшли подальший розвиток». Так, на с. 42 автор стверджує, щодо необхідності «уточнення рівнянь для обчислення кількості теплової енергії», по суті тут йде мова про удосконалення математичної моделі обліку теплової енергії.
2. У першому розділі основну увагу приділено аналізу методів розрахунку параметрів звужуючих пристроїв, проте автором недостатньо приділено уваги аналізу методів, алгоритмічного та програмного забезпечення обліку теплової енергії.
3. Запропонований спрощений алгоритм обчислення адіабати дає змогу скоротити кількість параметрів емпіричної моделі з 56 до 42. Таке

спрощення потягло за собою збільшення методичної невизначеності на 2,62% для діапазону зміни температури пари від 97°C до 800°C та тиску – від тиску насичення до 100 МПа. Доцільно було б дослідити як впливає таке спрощення алгоритму на величину загальної невизначеності обчислення кількості теплової енергії.

4. Слід було б обґрунтувати вплив невизначеності на комерційні показники при застосуванні різних схем вимірювання кількості теплової енергії.
5. Виходячи із того, що період квантування є досить малий (автор не наводить його значення), вибраний метод прямокутників для обчислення інтегралів, хоча метод трапецій не значно ускладнює алгоритм обчислення інтегралу та забезпечує вищу точність обчислень їхнього значення.
6. Визначаючи значення невизначеності вимірювання теплової енергії, автор допускає (с. 72), що невизначеності вимірювань підпорядковані нормальному закону Гауса, насправді, такий закон розподілу не завжди має місце.
7. Автор порівнює (с. 87) дві методики МИ 2412-97 і ГССД 187-99 і робить висновок, що розбіжність результатів за наведеними є незначною. Доцільно було б дати кількісну оцінку таких розбіжностей.
8. Чому оптимізація параметрів витратоміра зводиться лише до пошуку мінімуму невизначеності за відносним діаметром, адже невизначеність визначається цілим рядом інших параметрів: розмірами діафрагми, властивостями вимірювального середовища, прямолінійною ділянкою трубопроводу та ін.
9. Є певні зауваження щодо термінології: «подавальний трубопровід», напевне краще «трубопровід подачі теплоносія», «поправковий коефіцієнт (с. 39)» - «коефіцієнт поправки», «швидкість звуку води та водяної пари» (с. 79) - «швидкість звуку у воді та у водяній парі»; не буває точного вимірювання теплової енергії та інших параметрів, які зумовлюють процес опосередкованого вимірювання теплової енергії (с. 45, с. 47, с. 50, с. 56, с. 59); незрозумілий термін «умовно-постійна» витрата теплоносія (с. 70).
10. У дисертаційній роботі значний обсяг займають табл. 4.1 – 4.13 (с. 126 – 136), які мають допоміжне значення, і їх доцільно було б розмістити в додатках.

Однак, вказані зауваження, не зменшують значимості отриманих у роботі наукових і практичних результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок.

Дисертаційна робота Биць О.М. “Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску” є завершеною науковою працею, що містить нові наукові та практичні результати. Матеріал дисертації викладено чітко та послідовно із застосуванням наукової і технічної термінології відповідних галузей знань.

Зміст дисертаційної роботи відповідає спеціальності 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, за якою вона подана до захисту.

Дисертаційна відповідає вимогам п. 9-12 “Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167, а здобувач Биць Оксана Михайлівна заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри автоматизації
та комп’ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу
д.т.н, професор



М.І. Горбійчук

Підпис професора, д.т.н. Горбійчука М.І. засвідчую:

Вчений секретар

