

УДК

Ю.О. Шавурський, к.т.н.

Житомирський державний технологічний університет

## ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ БІОЛОГІЧНОГО ПАЛИВА У ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНОМУ ВИТРАТОМІРІ

Шавурський Ю.О. В статті розглянуто похибки вимірювання температури біологічного палива, що здійснюється на основі використання термоелектричного перетворювача у термоанемометричному витратомірі. Розглянуто складові частини похибки з урахуванням робочих умов використання витратоміра. Виконано експериментальні дослідження похибок витратоміра біологічного палива.

**Ключові слова:** біологічне паливо, термоанемометр, електричні перетворювачі

Шавурський Ю.А. В статье рассмотрены погрешности измерения температуры биологического топлива, которое осуществляется на основе использования термоэлектрического преобразователя в термоанемометричном расходомере. Рассмотрены составные части погрешности с учетом рабочих условий использования витратоміра. Выполнены экспериментальные исследования погрешностей витратоміра биологического топлива.

**Ключевые слова:** биологическое топливо, термоанемометр, электрические преобразователи

Shavursky Yuriy Oleksandrovich. The errors of measuring of temperature of biological fuel that comes true on the basis of the use of thermo-electric transformer in a термоанемометричному flowmeter are considered in the article. Component parts of error are considered taking into account the working terms of the use of витратоміра. Experimental researches of errors of витратоміра of biological fuel are executed.

**Keywords:** biofuels, Thermometers, electric converters

**Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з її науковими та практичними задачами.** Високоточні витратоміри палива необхідні у машинобудуванні, приладобудуванні та в автомобільній галузі. Однією з найбільш важливих галузей застосування є використання витратоміру в автомобілях у складі комплексу його приладів. Ефективність роботи всього комплексу значною мірою обумовлена саме конструкцією та точнісними характеристиками витратоміру. Одним з найперспективніших типів витратомірів для вимірювань витрат палива є термоанемометричний витратомір (ТАВ). Зростаючі вимоги до точності та швидкодії націлюють на пошук більш точних ТАВ.

Останнім часом, у зв'язку з дефіцитом та високою вартістю звичайного палива, перспективним вважається використання біопалива. Однак, відсутні роботи, в яких були б вирішені наступні задачі: надано опис ТАВ для автомобіля, працюючого на біопаливі, були б наведені всі необхідні розрахунки похибок такого ТАВ; був би проведений аналіз можливості та доцільності використання цього ТАВ.

Тому актуальною задачею є підвищення точності та швидкодії нового автоматизованого ТАВ для біопалива. Отримання математичних моделей та детальних характеристик похибок вимірювання температури біопалива в ТАВ дозволяє розробити методики та процедури їх алгоритмічної компенсації та підвищити точність визначення витрат цього палива в автомобілях.

**Аналіз існуючих досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Вагомий вклад у розвиток методів та засобів вимірювань витрат енергоносіїв внесли наукові школи, сформовані в інституті проблем моделювання в енергетиці ім. П.Е. Пухова НАНУ та в НТУУ «КПІ», та інші вищі навчальні заклади та установи НАН України.

Сьогодні відомі окремі описи конструкцій і технічні характеристики деяких витратомірів. Однак узагальненого порівняння аналізу точнісних характеристик ТАВ у літературі [1 – 9] немає. Окремі розрізні відомості стосуються деяких ТАВ або їх окремих аспектів.

У існуючих ТАВ [2,3,5,10] для вимірювання теплових параметрів біопалива використовується один або два термоперетворювачі, розташовані безпосередньо біля нагрівача. Математична модель існуючих витратомірів зводиться до рівня теплового балансу нагрівача, що охолоджується потоком рідини або до визначення різниці температур в двох фіксованих точках [10].

В розробленому високоточному ТАВ для підвищення точності визначення витрат моторного палива, використовуються групи термоперетворювачів. Таке рішення забезпечує визначення

© Шавурський Ю.О.

величини температурного поля в множині точок потоку моторного палива, а наступна алгоритмічна обробка отриманих значень на ЕОМ дозволяє компенсувати ряд похибок вимірювань. Тому для такого витратоміру необхідно створити нову математичну модель похибок вимірювання температури термоперетворювачами, що враховує детальний розподіл температурного поля в усіх точках потоку моторного біопалива.

У зв'язку з тим, що в літературі відсутні детальні відомості щодо математичної моделі ТАВ та його похибок, метою проведеного в статті дослідження є розробка математичної моделі похибок, що мають місце в ТАВ при визначенні температури біопалива термоелектричними перетворювачами. Ця модель може бути використана для алгоритмічної компенсації похибок і підвищення точності вимірювальних систем, що призначені для контролю поточних витрат біопалива.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** В даний час до витратомірів біопалива пред'являється багато вимог, задовольнити які достатньо складно.

Є дві групи вимог. До першої групи відносяться індивідуальні вимоги: висока точність, надійність, незалежність результатів вимірювання від зміни щільності речовини, швидкодія і значний діапазон вимірювання. До другої групи відносяться вимоги, які характеризують всю групу витратомірів палива: необхідність вимірювання витрати дуже різноманітної номенклатури речовини при властивостях, що відрізняються, різних значеннях витрати від дуже малих до надзвичайно великих і при різному тиску і температурах [2, 7, 9].

Розглянемо ці вимоги.

1. Висока точність вимірювання - одна з основних вимог, що пред'являються до витратомірів. Якщо раніше похибка вимірювання в 3,0 % вважалась задовільною, то у даний час потрібно мати похибку 1,5 %. Підвищення точності досягається як за рахунок застосування нових прогресивних методів і приладів (тахометричних, електромагнітних, ультразвукових і т. п.), так і за рахунок вдосконалення старих класичних методів. До найбільш точних належать камерні лічильники палива (зокрема, з овальними шестернями і лопастні). Похибка перших 0,5 %, а других навіть не більше 0,2 % від вимірюваної величини [11]. Витратоміри із звужуючими пристроями менш точні. Зниження їх похибки досягається за допомогою зносостійких діафрагм, а також при підвищенні точності дифманометров і застосуванні обчислювальних пристроїв для обліку зміни щільності речовини.

2. Надійність (наряду з точністю) - одна з головних вимог, що пред'являються до витратомірів палива. Основним показником надійності є час, в течію до якого прилад зберігає працездатність і достатню точність. Цей час залежить як від пристрою приладу, так і від його призначення і умов застосування.

Витратоміри, що встановлюються на автомобілях, значно відрізняються по своїй конструкції від стаціонарних приладів, вживаних в лабораторній практиці або в технологічних процесах багатьох виробництв, хоча в них, як правило, використовуються ті ж принципи дії. Особливості автомобільних приладів залежать від специфіки вимог, що пред'являються до них в експлуатації. Ці вимоги обумовлені наступними причинами.

На прилади, встановлені на автомобілях, впливають значні вібрація і трясіння. Так, на приладовій панелі сучасних автомобілів вібрація може досягати величини 0,5-2 g. Датчики приладів, розміщені на двигуні або трансмісії піддаються вібрації до 15 g. Тому прилади повинні безперервно і справно працювати в цих умовах [12].

В умовах експлуатації прилади працюють при різних температурах навколишнього середовища, що коливаються від мінус 60 °С в північних районах до плюс 60 °С в тропіках. При цьому залежно від місця установки приладу, температура його може досягати плюс 120 °С. На прилади потрапляє пил, бруд, вода, масло, паливо, солі (в умовах морського клімату), комахи і грибки (у вологих тропіках). Отже, матеріали і покриття витратомірів повинні бути стійкими до перерахованих дій, а внутрішні частини приладів ущільнені або герметизовані [11].

Електричні прилади з живленням від бортової мережі повинні бути малочутливі до змін напруги в межах 11–15 В в 12-вольтних мережах, та 22–30 В в 24-вольтних системах. Прилади також повинні бути нечутливими до пульсації живлячої випрямленої напруги, яка виникає у разі застосування генератора змінного струму.

Автомобілі використовують в місцевостях з різними висотами над рівнем моря, тому прилади повинні працювати при барометричному тиску, що практично зустрічається в районах, де є дороги, тобто при зміні атмосферного тиску від 650 до 800 мм.рт.ст.

Тахометричні прилади, елементи яких при вимірюванні безперервно рухаються, мають менший термін служби. Так, у турбінних витратомірів знос осі і опор буде тим менше, чим краща змащувана здатність вимірюваної речовини і чим вона чистіше. Для підвищення надійної роботи цих витратомірів необхідне застосування фільтрів або інших очисних пристроїв. У технічних умовах на деякі тахометричні витратоміри турбінного типу вказується шестирічний термін нормальної роботи [12].

3. Незалежність результатів вимірювання від зміни густини речовини. В більшості випадків необхідно мати пристрої, що автоматично вводять корекцію в показання приладу при зміні щільності (або температури і тиску) вимірюваної речовини. Лише у теплових і силових витратомірів, що вимірюють масову витрату, зміна щільності вимірюваної речовини дуже мало позначається на результатах вимірювання.

4. Швидкодія приладу, визначувана його гарними динамічними характеристиками, необхідна перш за все при вимірюванні швидко змінних витрат, а також у випадку застосування приладу в системі автоматичного регулювання.

Швидкодію більшості витратомірів зручно оцінювати значенням його постійної часу  $T$ , тобто часу, протягом якого покази приладу при стрибкоподібній зміні витрати від  $Q_1$  до  $Q_2$  змінюються приблизно на дві третини від значення  $Q_2 - Q_1$ . Турбінні витратоміри мають дуже малу постійну часу  $T$  (в межах сотих і тисячних долей секунди). У теплових же витратомірів час  $T$  вимірюється десятками секунд. Для поліпшення їх швидкодії застосовують особливі вимірювальні схеми (диференціюючі). Витратоміри зі звужуючими пристроями займають проміжне положення. У цих витратомірах час  $T$  зменшується зі зменшенням довжини сполучних трубок, а також вимірювального об'єму дифманометра і збільшенням його граничного перепаду тиску.

5. Великий діапазон вимірювання ( $Q_{max}/Q_{min}$ ) необхідний, коли значення витрати палива можуть змінюватися в значних межах. У приладів з лінійною характеристикою, наприклад електромагнітних, цей діапазон рівний восьми – десяти, у витратомірів зі звужуючими пристроями він дуже малий і рівний трьом. Збільшити його до дев'яти-десяти можна шляхом підключення до звужуючого пристрою двох дифманометрів. У теплових витратомірів можна за допомогою зміни потужності нагрівача одержати багатомезну шкалу з дуже великим загальним діапазоном вимірювання.

6. Дуже різноманітна номенклатура вимірюваних палив, які можуть бути не тільки однофазними, але і багатфазними. Основні методи вимірювання витрати палива були розроблені для однофазних палив.

При цьому треба враховувати як параметри (тиск, температуру), так і особливі властивості (агресивність, абразивність, токсичність, вибухо-небезпечність і та інш.) речовин.

Паливну економічність автомобілів доцільно оцінювати не тільки періодично (по контрольній витраті палива), але і безперервно під час руху: це дозволяє підтримувати автомобіль в технічно справному стані (підвищена витрата палива майже завжди пов'язана з несправностями вузлів і агрегатів автомобіля) і сприяє виробленню навиків економічного стилю водіння (при правильному виборі режимів можна економити до 30 % палива) [13].

При дослідженні похибок враховано ряд суттєвих особливостей, наявних у розробленому витратомірі моторного палива:

- тепловий вплив нагрівача має постійну потужність, що постійно підводиться до цього нагрівача;
- термоперетворювачі розташовані вздовж осі потоку моторного палива, тому розподіл температур визначається вздовж однієї просторової координати, що відповідає відстані термоперетворювача від нагрівача;
- моторне паливо з альтернативної сировини може мати різні фізико-хімічні властивості, а діапазон змін його витрат при експлуатації витратоміра на автомобільному транспорті може бути досить широким, тому розглядається як ламінарний, так і турбулентний режим течії моторного палива через витратомір;
- діапазон зміни початкової температури моторного палива при експлуатації витратоміра на автомобільному транспорті може бути досить широким, тому вводиться корекція витратоміру з урахуванням цієї температури.

Засобами вимірювання температури первинними термоперетворювачами, установками чи інформаційними вимірювальними системами, як і засоби вимірювання інших фізичних величин, не можуть забезпечити знаходження справжнього значення температури елементарного об'єму досліджуваного об'єкту, бо фізичні принципи й початкові умови виконання вимірювання так чи так порушуються. Результат вимірювання температури  $T_x$  відрізняється від її справжнього значення  $T_c$  на величину

$$\Delta T = T_x - T_c, \quad (1)$$

яку називають абсолютною похибкою. Відповідно до ГОСТ 16263-70 похибку вимірювання можна подавати в частках справжнього значення вимірюваної величини, яку називають відносною.

Результат вимірювання температури можна записати в Кельвінах чи в градусах Цельсія. Відносну похибку вимірювання температури для однозначності записують у вигляді

$$\delta T = (T_x - T_c) / T_c \quad (2)$$

і показують відсотками.

Похибку вимірювання визначають наближено з тією чи іншою точністю залежно від умов і застосовуваних засобів вимірювання, кількості спостереження та методів обробки експериментальних даних.

Для вимірювання температури біодизельного палива, було використано термоелектричні (ТТ) перетворювачі із структурами вимірювальних кіл зрівноважувального і прямого перетворення, кожне з яких має свої переваги та вади. Термоелектричні термометри з колами зрівноважувального перетворення, які мають невелику точність використовують у більшості для наукових досліджень. Точність можна підвищити ускладнюючи схему вимірювання і відповідно збільшивши її вартість, але це призведе до різкого зниження надійності термометра. Для масового вимірювання на автотранспортних засобах застосовують ТТ з колами прямого перетворення, бо вони є більш надійні та зберігають роботу здатність у будь-яких кліматичних умовах, мають малі габаритні розміри та масу і невисоку вартість.

Щоб дослідити і кількісно оцінити похибку вимірювання температури, розглянемо функцію перетворення термометра. Відомо, що зміну термо-ЕРС на виході термоелектричного перетворювача (ТЕП) у широкому діапазоні вимірюваних температур описує інтерполяційна формула

$$E = \sum_{i=0}^{\delta} a_i T^i, \quad (3)$$

де  $a_i$  – параметри функції перетворення ТЕП;  $T$  – температура робочого кінця ТЕП.

Урахувавши (3), можна записати залежність вимірюваної температури  $T$  від показу  $D$  термоелектричного термометра з прямим перетворенням:

$$D = KE = K(\sum_{i=0}^{\delta} a_i T^i), \quad (4)$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення термо-ЕРС на показ термометра  $D$ . У цьому разі припустимо, що реальні параметри  $a_0, a_1, \dots, a_\delta$  ТЕП є сталими і дорівнюють своїм номінальним значенням  $a_{0н}, a_{1н}, \dots, a_{\deltaн}$ , а вираз для номінальної функції перетворення термометра має вигляд

$$D = f_n(T, a_{0н}, a_{1н}, \dots, a_{\deltaн} \cdot K_n) \quad (5)$$

Під час тривалої експлуатації ТЕП у робочих умовах на діючому об'єкті його характеристика зазнає систематичного та випадкового дрейфу, внаслідок чого параметри функції перетворення термометра  $a_{0н}, a_{1н}, \dots, a_{\deltaн}$  змінюються і є випадковими функціями часу. Відчутної зміни зазнає і коефіцієнт  $K$  через похибку чутливості вторинного вимірювального приладу, а також через дію на термометр різних впливових величин від автомобіля та навколишнього середовища. Відмінність параметрів  $a_{0н}, a_{1н}, \dots, a_{\deltaн}$  і коефіцієнта  $K$  від номінальних значень призводить до появи в результаті вимірювання похибки, яку можна подати у вигляді різниці

$$\Delta_{сук} = f_c[T, a_0(\tau), a_1(\tau), \dots, a_\delta(\tau), K] - f_n(T, a_{0н}, a_{1н}, \dots, a_{\deltaн} \cdot K_n) \quad (6)$$

де  $f_c$  і  $f_n$  – справжні і номінальні функції перетворення ТТ.

Визначення похибки термоелектричного термометра відповідно до (6) передбачає внутрішню перевірку каналу температури разом з перетворювачем, але це зробити важко, бо немає взірцевих мір температури, а також способів їх відтворення в реальних умовах об'єкта. Тому похибку ТТ оцінюють на підставі нормованих метрологічних характеристик (МХ) окремих засобів вимірювання, що їх містить термометр. У цьому разі МХ визначають за результатами додаткових метрологічних випробувань засобів вимірювання.

Щоб кількісно оцінити похибку вимірювання, можна зобразити її математичною моделлю. Коли відомі МХ засобів вимірювання, то врахувавши їх реальний характер, на підставі ймовірно-статистичних методів дослідження похибок цих засобів вимірювання можна записати граничне значення похибки ТТ

$$\Delta_0(T) = \Delta_{с.о}(T) + \Delta_0 + \Delta(l) \quad (7)$$

де  $\Delta_{с.о}(T)$  – систематична складова похибки термометра, що її характеризує математичне сподівання  $M[\Delta_{с.о}(T)]$  і середнє квадратичне відхилення  $\sigma[\Delta_{с.о}(T)]$ ;  $\Delta_0$  – випадкова складова похибки вимірювання;  $\Delta(l)$  – функція впливу зовнішніх факторів на систематичну складову похибки термометра, яка практично залежить від дії на вимірювальний прилад зовнішніх факторів, тобто  $\Delta(l) = \Delta_{с.л}(l)$ .

Дослідивши механічну характеристику термоелектричного перетворювача, вимірювального приладу і компенсаційних провідників, визначаємо оцінку математичного сподівання систематичної складової похибки ТЕП, вимірювального приладу і компенсаційних провідів за нормальних умов:

$$\tilde{M}[\Delta_{с.о}(T)] = \{\tilde{M}[\Delta_{с.ТЕП}(T)] + \tilde{M}[\Delta_{с.к.л}(T)]\}K + \tilde{M}(\Delta_{с.о.ВПР}) \quad (8)$$

де  $\tilde{M}[\Delta_{с.ТЕП}(T)] + \tilde{M}[\Delta_{с.к.л}(T)]$  і  $\tilde{M}(\Delta_{с.о.ВПР})$  – оцінки математичного сподівання систематичної складової похибки відповідно ТЕП, компенсаційних провідів і вимірювального приладу.

Середнє квадратичне відхилення (СКВ) систематичної складової  $\delta(\Delta_{с.о})$  обчислюють статистичним підсумуванням значень СКВ складової похибки ТЕП  $\delta(\Delta_{с.к.л})$

$$\delta(\Delta_{с.о}) = \sqrt{\delta^2(\Delta_{с.ТЕП}) + \delta^2(\Delta_{с.к.л}) + \delta^2(\Delta_{с.ВПР})} \quad (9)$$

Похибку ТТ з урахуванням робочих умов вимірювання на об'єкті знаходять, досліджуючи вплив на неї зміни напруги живлення, температури навколишнього повітря, опору лінії зв'язку в разі зміни однієї з впливових величин і спільної їх зміни. Математичне сподівання систематичної складової похибки термометра з урахуванням зміни впливових величин оцінюють

методами регресійного аналізу [5], з урахуванням даних досліджень [6], математичне сподівання похибки, зведеної до входу термометра, в умовах експлуатації розраховують за таким рівнянням:

$$\begin{aligned} \tilde{M}[\Delta_C(T, l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_n)] = & \{ \tilde{M}[\Delta_{с.ТЕП}(T)] + \tilde{M}[\Delta_{с.к.п.}] \} K + \\ & + \tilde{M}[\Delta_{с.ВПР}(E, l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_n)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Оцінюючи похибку термометра в робочих умовах експлуатації на об'єкті, не враховують методичних похибок, значущість яких потрібно з'ясувати в кожному конкретному випадку. Коли ці похибки чималі, то вислідна похибка

$$\Delta_{с.к.с} = \Delta(T, l) + \Delta_{м.} \quad (11)$$

де  $\Delta_{м.}$  – сумарна методична похибка.

Таким способом оцінюють досліджену похибку вимірювання під час періодичної перевірки чи метрологічної атестації вимірювальних каналів температури [6]. Коригуючись результатами вимірювань в цьому разі автоматично або ручним способом, вилучаючи знайдене експериментально-розрахунковим шляхом оцінювання значення систематичної складової похибки.

Результати дослідження похибки витратоміра наведено на рис. 1.

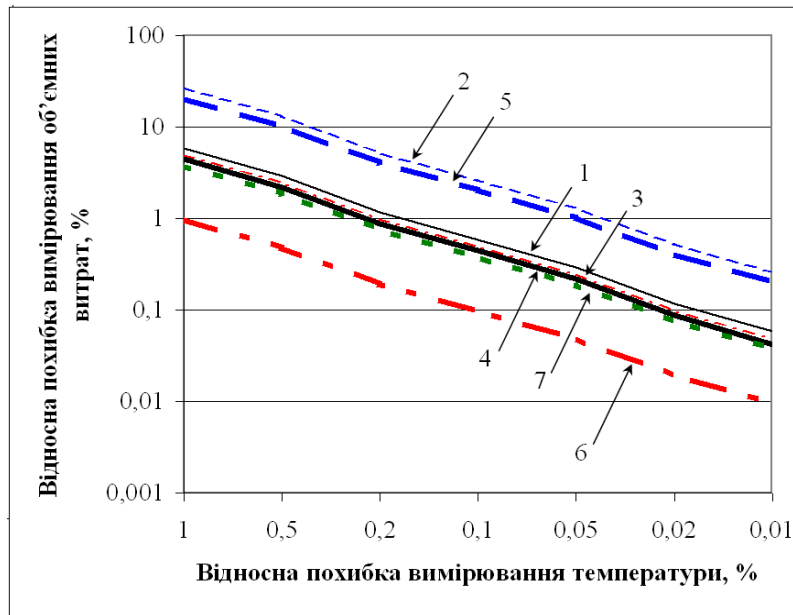


Рис. 1. Відносна похибка вимірювання об'ємних витрат біодизельного палива розробленим витратоміром (нумерація відповідає нумерації варіантів визначення об'ємних витрат)

Розглядалися сім варіантів визначення витрат моторних палив:

1. Визначення витрат на основі вимірювання температури нагрівача і початкової температури моторного палива;
2. Визначення витрат на основі вимірювання початкової температури моторного палива і температури моторного палива в двох точках вздовж вісі трубки з усередненням результатів для цих двох точок;
3. Підвищення точності варіанту 2 на основі алгоритмічної компенсації випадкових і динамічних похибок за допомогою штучних нейронних мереж (згідно патенту [14,15]);
4. Підвищення точності варіанту 1 на основі апроксимації результатів вимірювання температури термоперетворювачами та компенсації похибок цих вимірювань (згідно патенту [14,15]);

5. Підвищення точності варіанту 2 на основі апроксимації результатів вимірювання температури термоперетворювачами та компенсації похибок цих вимірювань (згідно патенту [14,15]);

6. Підвищення точності варіанту 1 на основі:

– алгоритмічної компенсації випадкових і динамічних похибок за допомогою штучних нейронних мереж (згідно патенту [14,15]);

– апроксимації результатів вимірювання температури термоперетворювачами та компенсації похибок цих вимірювань (згідно патенту [14,15]);

7. Підвищення точності варіанту 2 на основі:

– алгоритмічної компенсації випадкових і динамічних похибок за допомогою штучних нейронних мереж (згідно патенту [14,15]);

– апроксимації результатів вимірювання температури термоперетворювачами та компенсації похибок цих вимірювань згідно патенту [14,15].

### Висновки

ТАВ при визначенні витрати біопалива:

- забезпечує вищу точність вимірювань (до 1,5 %);

- забезпечує вищу швидкість, ніж відомі прилади, оскільки гарантує безперервний процес вимірювань у реальному часі.

Розроблено нову математичну модель похибок термоанемометричного витратоміра, отримано аналітичні вирази для розрахунків його основних похибок.

При мінімальних об'ємах алгоритмічних обчислень найбільш доцільно використання варіанту визначення витрат на основі вимірювання температури нагрівача і початкової температури моторного палива. Такий підхід забезпечує точність вимірювання об'ємних витрат моторного палива 1,0...1,5 % при точності вимірювання температури нагрівача 1 %.

Для підвищення точності витратоміра необхідно використання більш складних алгоритмічних процедур (апроксимація результатів вимірювань температури біопалива на основі методу найменших квадратів та використання штучних нейронних мереж). Це забезпечує точність вимірювання об'ємних витрат моторного палива 1,0 ... 1,5 % при точності вимірювання температури нагрівача 1%.

### Список використаних джерел:

1. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Івахів О.В., Бойко Т.Г. Засоби та методи вимірювання неелектричних величин / Є.С. Поліщук – М: Бескид Біт, 2008. – 606 с.
2. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования / Агейкин Д.И. -М., Машиностроение, 1965. -928с.
3. Муринов Г.А. Теплотехнические измерения. - М.: Энергия, 1979. - 42- с.
4. Киясбейли А.Ш., Лифшиц Л.М. Первичные преобразователи систем измерения расхода и количества жидкостей. Энергия, М.: 1980, с. 76-80.
5. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: Учебное пособие. - М.: Энергия, 1978. -704 с.
6. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин, - Л.: Энергия, 1975. - 576 с.
7. Яцук В.О., Малачівський П.С. Методи підвищення точності вимірювань. - М: Бескид Біт, 2008. – 368 с.
8. Безвесільна О.М., Загавура Ф.Я. – Витратометрія: Підручник. – К.: Либідь, 1996.-184с.
9. Безвесільна О.М., Таланчук П.М. - Перетворюючі пристрої приладів – К.:ІСДО, 1994. – 448с.
10. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. -Л.: Машиностроение, 1989. - 701 с.
11. Бирюков Б. В., Данилов М. А., Кивилис С. С. Погрешности установок точного измерения расхода. - Измерительная техника, 1975, № 10, с. 43-45.
12. Бошняк Л. Л. Измерения при теплотехнических исследованиях. Л., Машиностроение, 1974. 448 с.
13. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963. 708 с.
14. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О., Шавурський Ю.О. Високоточний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації. Патент на винахід №91160 від 25.06.2010р. по заявці №а2009 06515 від 22.06.2009 р.
15. Безвесільна О.М., Шавурський Ю.О., Подчашинський Ю.О., Ільченко А.В. Калориметричний витратомір моторного палива з цифровою обробкою вимірювальної інформації. Патент на винахід №90985 від 10.06.2010 р. По заявці №а 2009 10565 від 19.10.2009р.