

Ю.О. Шавурський, к.т.н., доц.
О.О. Багінський, асистент

Державний університет «Житомирська політехніка»

Математичне моделювання термоанемометричного витратоміра для вимірювання витрати автомобільного дизельного палива з індукційним нагрівальним контуром

Проведено математичне моделювання індукційного нагрівального елемента (ІНЕ) в основі термоанемометричного витратоміра (ТАВ) для вимірювання витрати дизельного палива (ДП). На витрату ДП впливає багато факторів, що може відобразитися на точності ТАВ, а саме: температура палива, домішки і його в'язкість. Нагрівальний елемент у вигляді тенів, який раніше досліджувався у публікації [1], є контактним у середовищі палива, що збільшує ризик займання палива під час проходження через нього великого струму. В індукційному ТАВ нагрів регулюється шляхом його циклічного включення і виключення. Сам процес нагрівання ДП у ТАВ заснований на генерації індуктованих електричних струмів всередині трубопроводу, що сприяє високій ефективності, оскільки тепло генерується лише там, де це необхідно, і головне – не контактує з займистою речовиною, такою як ДП. Цьому процесу допомагають датчики температури (термопара), що входять в систему управління. Для цього встановлюється підібраний температурний режим для ДП і ТАВ: після нагріву теплоносія до певної температури автоматично вимикається, а після охолодження знову вмикається.

За рядом критеріїв, таких як матеріал ТАВ з індукційним нагрівачем, довжина, діаметр і товщина стінок трубопроводу ТАВ, швидкісні режими подачі палива, математично змодельовано кількість енергії з відповідною частотою напруги, що подається на два індукційні нагрівальні елементи, для підтримки постійної різниці температур залежно від об'ємної витрати палива Q . За даними змодельованих параметрів залежності напруги (вихідний сигнал витратоміра) та кількості витрати палива через ТАВ визначено, що рівень вихідного сигналу достатній для проведення вимірювань витрати палива в широкому діапазоні значень.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання; витрата палива; індукційність; термоанемометр; вимірювання; дизельне паливо; моделювання; нагрівальний елемент.

Актуальність теми. Термоанемометричні витратоміри для вимірювання витрат потоку палива є актуальними на теперішній час, оскільки мають високу точність вимірювання. Витрата палива – це виклик для кожного водія зокрема для підприємств, які мають великі власні автопарки, оскільки ціни на пальне у світі щороку зростають. Тому для контролю витрати палива і ефективнішого використання транспортних засобів було прийнято рішення використовувати термоанемометричний витратомір з індукційними нагрівальними елементами на вимірювальній ділянці трубопроводу.

Нагрівання теплоносія в ТАВ відбувається рівномірно – перепад температур у системі не більше за $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тобто локальних перегрівів, що здатні призвести до займання, немає, що робить такий вид нагрівання пожегобезпечним. Точність вимірювання витрат можна досягнути саме за рахунок інерційних складових, в цьому випадку за рахунок індукційного нагрівача. За рахунок енергоефективності індукційного нагрівача ця система перетворює до 90 % витраченої енергії на корисне тепло, тоді як ефективність контактних нагрівальних елементів становить до 60 %.

Продуктивність, а саме швидкість нагрівання, можна змінювати за рахунок індукційного процесу. Менш ніж за секунду тепло почне миттєво обгортати трубопровід і передавати тепло до палива, нагріваючи його за короткий проміжок часу. Крім того, сам цикл нагрівання можна контролювати через контролер управління, що дозволяє повністю автоматизувати процес разом з датчиками потоку палива.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нагрівання моторного палива для транспортних засобів за допомогою ТАВ є актуальним у сфері вимірювання витрати палива з високою ефективністю та точністю до 1 % [2]. Індукційні нагрівачі рідин мають високу надійність, практично повну відсутність потреби в періодичному технічному обслуговуванні та перевірені методики первинного проектування [3]. Порівняно з нагрівачами в теплових витратомірах, що працюють за принципом контактного нагріву вимірюваного палива [4, 6, 7], індукційний метод нагріву палива дозволяє уникнути контактного нагріву, що підвищує безпеку роботи витратоміра палива.

Метою статті є математичне моделювання термоанемометричного витратоміра дизельного палива з індукційним нагрівачем з автоматизованою системою керування датчиками і нагрівальними елементами в одній парі, які розміщені на магістралі від паливного бака до входу рампи двигуна.

Викладення основного матеріалу. На теперішній час інтерес до методів економічного виробництва та покращення контролю якості [5] призвів до повторного відкриття індукційної технології разом із

розробкою саме керованих твердотільних індукційних джерел живлення. При індукційному нагріванні генерація електромагнітного поля створює тепловиділення.

Основні принципи індукційного нагрівання [6] були зрозумілі та застосовані в промислових процесах з 1920-х рр. Під час Другої світової війни технологія швидко розвивалася, щоб задовольнити термінову потребу воєнного часу пошуку швидкого та надійного процесу зміцнення металевих частин двигуна.

Індукційне нагрівання – це процес, який використовується для зварювання, загартування або гартування металів або інших електропровідних матеріалів. Для сучасних виробничих процесів індукційне нагрівання пропонує привабливе поєднання швидкості, стабільності, контролю та енергоефективності. Подача змінного електричного струму на первинну обмотку трансформатора створює змінне магнітне поле. Відповідно до закону Ленца – Фарадея, якщо вторинна обмотка трансформатора знаходиться всередині магнітного поля, буде індукований електричний струм.

Якщо ми прикладемо змінну різницю потенціалів U до затискачів котушки, змінний струм, який проходить через цю котушку, створюватиме змінну магнітну індукцію на частоті струму. Якщо ми помістимо провідний предмет поблизу котушки, він піддається змінному магнітному потоку. Цей потік у свою чергу відповідно до закону Фарадея [7], індукує електрорушійну силу, яка спричиняє індукційні струми, що циркулюють у провіднику. Ці індуковані струми є вихровими струмами, які нагрівають тіло через ефект Джоуля [11].

Коли струм I (А) протікає через електричний провідник з опором R (Ом), потужність, що розсіюється P (Вт) у провіднику, має тип:

$$P = RI^2. \quad (1)$$

При індукційному нагріванні s – це цей ефект, який робить можливим перетворювати індукційні струми в тепло, а потім передаватися через теплову конвекцію в тілі, яке нагрівається – закон Фарадея. Це поле називається індукованим електричним полем. [6] Протягом часу dt зміна повного магнітного потоку через будь-яку поверхню, що лежить на контурі (С), становить: е. р. с. індукований E виражається за допомогою закону Фарадея:

$$E = -\frac{dQ}{dt}, \quad (2)$$

де: E – індукована напруга (В); Q – тепловий потік (Вт); t – час (с).

Цей закон, встановлений експериментально для відносно повільних змін магнітного потоку залежно від часу, справедливий для будь-якого змінного режиму і слугує основою для вивчення електромагнетизму.

За результатами досліджень з інших джерел було проаналізовано, що ця технологія дозволяє швидко і точно регулювати температуру і що застосування магнітного поля не викликає додаткового засмічення теплообмінника.

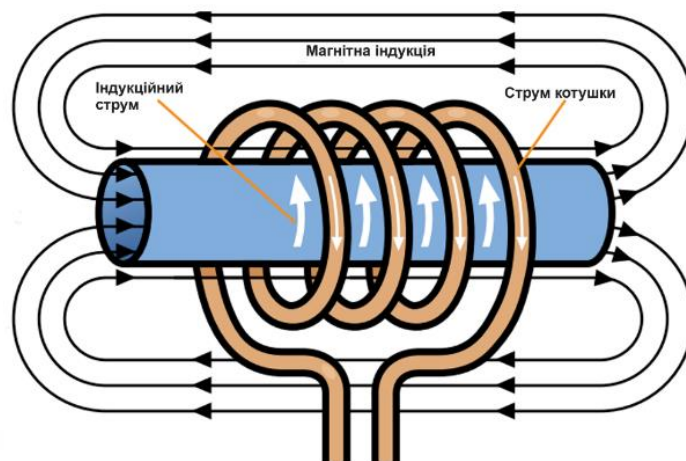


Рис. 1. Основи індукційного нагрівання

Особливість використання надає кілька переваг, таких як скорочення часу нагрівання та високі продуктивності, або можливість дуже вибіркового нагрівання [5–8]. Незважаючи на ці переваги, управління цим типом нагрівання вимагає досконалого знання про електромагнітні і теплові величини під час процесу, і для цього необхідна стадія моделювання.

Глибина проникнення, або скін-ефект, характеризує розподіл індукційних струмів у частині, що нагрівається. Коли електропровідна речовина піддається дії змінного магнітного поля, щільність індукційних струмів експоненціально зменшується до центру частини до поверхні. Саме ці

нерівномірності щільності індукційних струмів і перекладаються під назвою скін-ефект, характерною величиною якого є глибина проникнення магнітного поля або товщина шару [8]. Теоретична формула дозволяє знайти товщину шару:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r f \pi \sigma}}, \quad (3)$$

де: μ_0 – магнітна проникність; μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу; σ – електропровідність металу; f – частота джерела, що використовується.

Отже, глибина проникнення δ залежить від частоти змінного поля і δ зменшується, коли f збільшується, залежно від матеріалу металу, який потрібно нагріти, з огляду на магнітну проникність та електропровідність. У таблиці 1 групуються порядки величини δ залежно від кількох матеріалів для різних частот:

Таблиця 1

Деякі значення глибини проникнення δ , виражені в мм, для відносної проникності

f (Гц)	Сталь ($\infty_r = 0$) 20 °C	Сталь 800 °C	Мідь 20 °C	Мідь 800 °C	Алюміній 20 °C	Алюміній 500 °C	Графіт 20 – 1300 °C
50	3,18	67,2	9,35	19,4	11,9	19,4	201
100	2,25	47,5	6,61	13,4	8,4	13,4	142
10^3	0,71	14,6	2,09	4,26	2,66	4,26	45
10^4	0,225	4,75	0,661	1,34	0,84	1,34	14,2
10^5	0,071	1,46	0,209	0,426	0,266	0,426	4,5
10^6	0,0225	0,475	0,066	0,134	0,084	0,134	1,42
10^7	0,007	0,146	0,021	0,043	0,0266	0,043	0,45

Пристрій індукційного нагріву по суті містить: джерело електричного живлення, що враховує, як правило, генератор середньої або високої частоти, перетворювач, що дозволяє створювати електричні струми з потрібною частотою, адаптаційний трансформатор, необхідний для регулювання напруги і батареї конденсаторів, нагрівальний індуктор, навантаження, що підлягає нагріванню, систему охолодження індуктора та інших компонентів живлення, органи управління та керування. Структурна схема робота ТАВ з індукційним нагрівачем має такий вигляд (рис. 2).

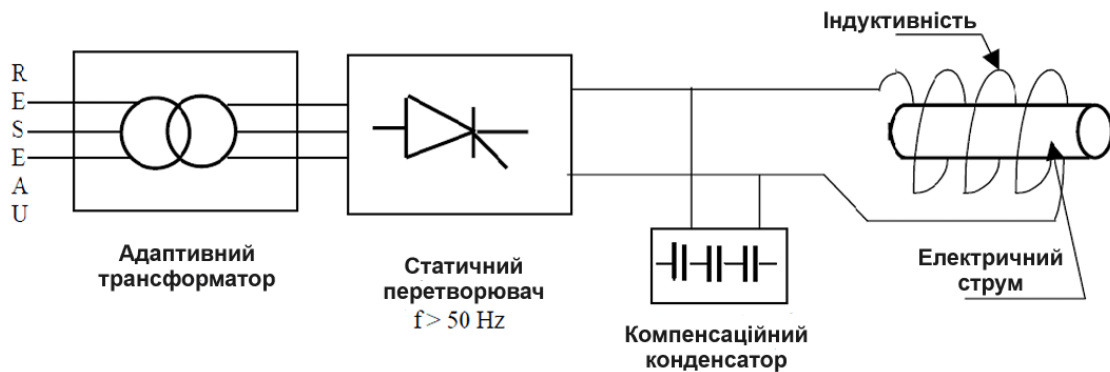


Рис. 2. Структурна схема ТАВ з індукційним нагрівачем

Оскільки передана потужність залежить від частоти, вона також залежить від квадрата магнітного поля, тобто квадрата напруженості [10], що створює це поле. Тому залежно від бажаного теплового застосування необхідно правильно розрахувати інтенсивність індукційних струмів.

Математична модель описується диференціальним рівнянням з частковими похідними, які описують електромагнітні та теплові явища систем, представлених у двовимірному циліндричному випадку, які можна описати таким виразом:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v \partial A}{r \partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v \partial A}{r \partial r} \right) - J w \frac{\sigma}{r} A = -J. \quad (4)$$

На основі досліджених даних, які можна було отримати моделюванням для ТАВ, було проаналізовано низку критеріїв, які впливали на витрату палива, а саме: товщину стінки трубопроводу, тип металу, довжину індукційного нагрівального елемента, частоту напруги, яка подається на індукційну котушку, і швидкість течії палива, яку також необхідно вирахувати для різних витрат.

На цьому етапі проектування витратоміра палива на основі однорідності теплових і фізичних характеристик було отримано деякі параметри і верифіковано результати у вигляді графіків (рис. 3).

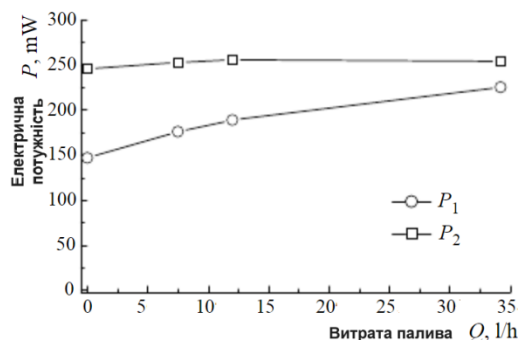


Рис. 3. Кількість електроенергії P_1 і P_2 , що подається на індукційні нагрівальні елементи відповідно, для підтримки постійної різниці температур $T - T_w = 5 \text{ K}$ залежно від об'ємної витрати палива Q

Як випливає з рисунка 3, кількість електроенергії P_1 суттєво залежить від витрати палива Q , на відміну від величини P_2 , яка майже не залежить від Q . Таким чином, результати обчислювального моделювання говорять про те, що розроблений за результатами обчислювального моделювання [9, 10] індукційний нагрівальний елемент є ефективним для використання в межах диференціального методу вимірювання.

Для перевірки аналітичної моделі, розробленої під час цієї роботи, проведено порівняння моделі результатів експериментальних даних. Один результат, отриманий за допомогою аналітичної моделі, що виражає зв'язок між різницею електричних потужностей ΔP , що підводиться до термочутливих елементів у рухомій і нерухомій рідині, та об'ємною витратою Q рідини в каналі. Оскільки мікросенсори, які використовуються в експерименті, мають різні термічні та фізичні характеристики, для того щоб зробити дійсне порівняння, ми маємо використовувати експериментальні дані, отримані від одного датчика, як показано нижче:

$$\Delta P = P_1(Q) - P_1(Q = 0). \quad (5)$$

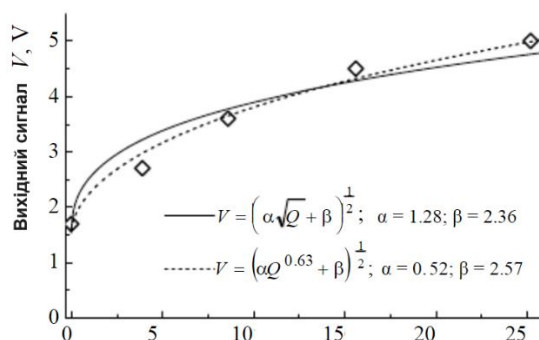


Рис. 4. Напруга V (вихідний сигнал ТАВ), необхідна для подачі на чутливий до температури елемент у потоці для підтримки постійної температури як функції об'ємної витрати палива Q

На рисунку 4 показано порівняння результатів аналітичної моделі з відповідними математичними даними. Як було запропоновано, найкраще узгодження з експериментальними даними було отримано за допомогою рівняння 6:

$$\Delta P = k \cdot Q^\gamma. \quad (6)$$

Збільшення коефіцієнта γ від 0,5 до 0,63 свідчить про наявність турбулентності в потоці палива. Дійсно, як випливає, значення $\gamma = 0,5$ описує течію рідини в ламінарному режимі. У цьому експерименті складна форма могла спричинити турбулізацію [6, 11] потоку. Рівняння 7 аналітичної моделі представляє величину напруги V , яку необхідно подавати на чутливий до температури елемент у потоці палива для підтримки постійної температури як функцію об'ємної витрати рідини Q :

$$V = (\alpha Q^\gamma + \beta)^{1/2}, \quad (7)$$

де α і β – вільні параметри, γ^* – значення, отримане в результаті обробки експериментальних даних.

На рисунку 4 показано експериментальну та теоретичну залежність напруги V (вихідний сигнал витратоміра) про величину витрати Q палива через трубопровід. Як випливає з рисунка 4, можна

спостерігати узгодженість між результатами аналітичної моделі та експериментальними даними. Як і в попередньому випадку, найкращу відповідність було отримано з $\gamma = 0,63$.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У цій статті було змодельовано використання термоанемометричного витратоміра з нагрівальним елементом у вигляді індукційного нагрівача. Перевагою цього нагрівального елемента є підвищення точності за рахунок інерційності нагрівання палива в трубопроводі з недопусканням його перегріву, оскільки сам індукційний елемент працює безконтактним методом. Недоліком цього методу є саме вартість індукційного нагрівача з повним комплектом його підключення до генератора середньої або високої частоти, а також перетворювальні елементи.

Проведене моделювання дослідного зразка витратоміра палива диференціальним методом вимірювання показали, що рівень вихідного сигналу достатній для проведення вимірювань витрати палива в широкому діапазоні значень. В цілому отримані результати важливі для проєктування, виробництва та оптимізації витратомірів палива.

Список використаної літератури:

1. *Безвесільна О.М.* Високоточний термоанемометричний витратомір з цифровою обробкою вимірювальної інформації / *О.М. Безвесільна, Ю.О. Шавурський* // *Матеріали Всеукраїнської НПК, присвяченої Дню науки.* – Житомир, 2014. – С. 98–99.
2. Теплові процеси за умов індукційного нагрівання полем плоского кругового багатовиткового соленоїда / *А.В. Гнатів та ін.* // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – 2015. – № 5. – С. 87–92.
3. *Макарчук О.В.* Особливості проєктування індукційного водонагрівача / *О.В. Макарчук, Б.І. Крохмальний, В.Г. Гайдук* // *Електроенергетичні та електромеханічні системи.* – 2020. – Т. 2. – № 1. – С. 43–51.
4. *Korobiichuk I.* Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement / *I.Korobiichuk, A.Ilchenko* // *Sensors.* – 2022. – № 22. DOI: 10.3390/s22228882.
5. *Bezvesilna O.* Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels / *O.Bezvesilna, M.Kamiński, A.Ilchenko* // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2017. – № 550. – P. 505–511.
6. *Кухар В.В.* Проєктування індукційних нагрівачів і безпека при електротермічному нагріванні : навчальний посібник / *В.В. Кухар, Ю.П. Ніжельська, А.С. Аніщенко.* – ДВНЗ «ПДТУ», 2016. – 172 с.
7. Numerical modeling in induction heating of long workpieces / *C.Chaboudez, S.Clain, R.Glardon et al.* // *IEEE Trans. Magn.* – 1994. – Vol. 30, № 6. – P. 5028–5037.
8. *Безвесільна О.М.* Основні вимоги до витратомірів автомобільного біодизельного палива / *О.М. Безвесільна, Ю.О. Шавурський* // *Вісник ЖДТУ.* – 2009.
9. *Ільченко А.В.* Урахування властивостей двокомпонентних палив у процесі вимірювання їх витрати термоанемометричним витратоміром / *А.В. Ільченко, А.О. Романова* // *Вісник ЖДТУ.* – 2007.
10. Засоби та методи вимірювання неелектричних величин / *Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, О.В. Івахів, Т.Г. Бойко.* – М. : Бескид Біт, 2008. – 606 с.
11. Contribution à l'Étude des Phénomènes de Chauffage par Induction [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docplayer.fr/74468585-Contribution-a-l-etude-des-phenomenes-de-chauffage-par-induction.html>.
12. Chauffage par induction électromagnétique: principes [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://docplayer.fr/34336474-Chauffage-par-induction-electromagnetique-principes.html>.

References:

1. Bezvesilna, O.M. and Shavurskyi, Yu.O. (2014), «Vysokotochnyi termoanemometrychnyi vytratimir z tsyfrovou obrobkou vymiryvalnoi informatsii», *Materialy Vseukrainskoi NPK, prysviachenoi Dniu nauky, Zhytomyr*, pp. 98–99.
2. Hnatov, A.V. et al. (2015), «Teplovi protsesy za umov induktsiinoho nahrivannia polem ploskoho kruhovoho bahatovytkovoho solenoida», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, No. 5, pp. 87–92.
3. Makarchuk, O.V., Krokhmalnyi, B.I. and Haiduk, V.H. (2020), «Osoblyvosti proektuvannia induktsiinoho vodonahrivacha», *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*, Vol. 2, No. 1, pp. 43–51.
4. Korobiichuk, I. and Ilchenko, A. (2022), «Optimal Design Parameters of Thermal Flowmeter for Fuel Flow Measurement», *Sensors*, No. 22, doi: 10.3390/s22228882.
5. Bezvesilna, O., Kamiński, M. and Ilchenko, A. (2017), «Heat transfer in the thermo-anemometric flowmeter for biofuels», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, No. 550, pp. 505–511.
6. Kukhar, V.V., Nizhelska, Yu.P. and Anishchenko, A.S. (2016), *Proektuvannia induktsiinykh nahrivachiv i bezpeka pry elektrottermichnomu nahrivanni*, navchalnyi posibnyk, DVNZ «PDTU», 172 p.
7. Chaboudez, C., Clain, S., Glardon, R. et al. (1994), «Numerical modeling in induction heating of long workpieces», *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No. 6, pp. 5028–5037.
8. Bezvesilna, O.M. and Shavurskyi, Yu.O. (2009), «Osnovni vymohy do vytratimiriv avtomobilnoho biodyzelnogo palyva», *Visnyk ZhDTU*.
9. Ilchenko, A.V. and Romanova, A.O. (2007), «Urakhuvannia vlastyvostei dvokomponentnykh palyv u protsesi vymiryuvannia yikh vytraty termoanemometrychnym vytratomirom», *Visnyk ZhDTU*.
10. Polishchuk, Ye.S., Dorozhovets, M.M., Ivakhiv, O.V. and Boiko, T.H. (2008), «Zasoby ta metody vymiryuvannia neelektrychnykh velychyn», *Beskyd Bit, M.*, 606 p.

11. «Contribution à l'Etude des Phénomènes de Chauffage par Induction», [Online], available at: <https://docplayer.fr/74468585-Contribution-a-l-etude-des-phenomenes-de-chauffage-par-induction.html>
12. «Chauffage par induction électromagnétique, principes», [Online], available at: <https://docplayer.fr/34336474-Chauffage-par-induction-electromagnetique-principes.html>

Шавурський Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б.Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4590-4156>.

Наукові інтереси:

- системи електротехнічного устаткування в машинобудуванні;
- витратоміри;
- альтернативні джерела енергії.

Багінський Олександр Олександрович – асистент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0272-3707>.

Наукові інтереси:

- енергозберігаючі технології на автомобільному транспорті;
- сертифікаційні випробування автотранспорту.

Shavurskiy Y.O., Bahinskiy O.O.

Mathematical modeling of a thermo-anemometric flow meter for measuring automotive diesel fuel consumption with an induction heating circuit

The article investigates mathematical modeling of the induction heating element (IHE) at the base of the thermo-anemometric flow meter (TAFM) for measuring the flow of diesel fuel (DF). The consumption of DF is affected by many factors that can affect the accuracy of TAFM, namely fuel temperature, impurities and its viscosity. The heating element in the form of shadows, which was previously studied in the publication [1], is in contact with the fuel medium, which increases the risk of fuel ignition when a large current passes through it. In the induction TAFM, the heating is regulated by turning it on and off cyclically. The very process of heating DF in TAFM is based on the generation of induced electric currents inside the pipeline, which contributes to high efficiency, since heat is generated only where it is necessary and most importantly - does not come into contact with a flammable substance, such as DF. This process is helped by temperature sensors (thermocouple) included in the control system. For this purpose, a selected temperature mode is set for DF and TAFM, after heating the coolant to a certain temperature, it is automatically turned off, and after cooling, it is turned on again.

According to a number of criteria, such as TAFM material with an induction heater, length, diameter and wall thickness of the TAFM pipeline, high-speed modes of fuel supply - the amount of energy with the appropriate voltage frequency supplied to two induction heating elements to maintain a constant temperature difference depending on from the volumetric fuel consumption Q . Based on the data of the simulated parameters of the voltage dependence (output signal of the flow meter) and the quantitative fuel consumption through the TAFM, it was determined that the level of the output signal is sufficient for measuring the fuel consumption in a wide range of values.

Keywords: internal combustion engine; fuel consumption; inductance; thermal anemometer; measurement; diesel fuel; modeling; heating element.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2023.