УДК 543.271.3

Наталія Миколаївна Защепкіна, Ігор Владиславович Приміський
Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИМІРЮВАЧ ДИМНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Анотація

Розглянуто нормативну правову базу застосування вимірювачів димності (димомірів) відпрацьованих газів дизельних двигунів. Проаналізовані дані щодо викидів забруднюючих речовин з відпрацьованих газів дизельних і бензинових двигунів, методи вимірювання димності «Bosch», «Hartridge», проблеми нестабільності коефіцієнта перетворення димоміра в цілому внаслідок старіння оптичних елементів схеми, впливу температури і вологості у вимірювальній камері.

Розглянуто вдосконалену нову структурну схему димоміра, яка компенсує старіння елементів оптичної схеми димоміра під дією високотемпературного високотоксичного відпрацьованого газу дизельного двигуна, функціональну схему побудови димоміра, наведені технічні характеристики. Розроблені схеми забезпечують інваріантність вимірювання димності від дестабілізуючих факторів, відхилення коефіцієнта перетворення димоміра від номінального значення. Експериментальні дослідження показали, що основна приведена похибка вимірювань димоміра знижується з 2% до 0,5%. Наведено метрологічне забезпечення сучасних вимірювачів димності.

Ключові слова: димомір, вимірювання, коефіцієнт перетворення, оптичний фільтр, похибка.

Annotation

The regulatory legal framework for the use of smoke detectors (smoke detectors) of exhaust gases of diesel engines is considered. Analyzed data on emissions of pollutants from the exhaust gases of diesel and gasoline engines, "Bosch", "Hartridge" smoke measurement methods, problems of instability of the conversion coefficient of the smoke meter as a whole as a result of the aging of the optical elements of the temperature and humidity influence scheme in the measuring chamber. An improved new structural scheme of the smoke meter, which compensates for the aging of the elements of the optical scheme of the smoke meter under the influence of high-temperature, highly toxic exhaust gas of a diesel engine, the functional scheme of the construction of the smoke meter, and technical characteristics are considered.

The developed schemes ensure the invariance of smoke measurement from destabilizing factors, the deviation of the conversion coefficient of the smoke meter from the nominal value. Experimental studies have shown that the main reduced measurement error of the smoke meter is reduced from 2% to 0.5%. The metrological support of modern smoke detectors is presented.

Keywords: smoke meter, measurement, conversion factor, optical filter, error.

Німецький винахідник Рудольф Дизель в 1892 р. розробив принцип роботи дизельного двигуна, якому не потрібні свічки запалювання, як в класичному бензиновому двигуні внутрішнього запалювання, а паливо запалюється від нагрітого повітря. Нагрівання повітря відбувається від поршня, який стискає повітря, для його стрибкоподібного нагріву в циліндрі, куди надходить (впорскується) через форсунки розпилене паливо, паливо взаємодіє з нагрітим повітрям. Паливо загоряється, створює енергію, яка штовхає поршень циліндра вниз і передає енергію колінчастому валу двигуна, і далі цикл повторюється. Потужність дизельного двигуна напряму залежить від ступеня стиснення повітря. На відміну від бензинового ДВС паливна суміш в дизельному двигуні утворюється прямо в циліндрі.

Дизельні двигуни мають ряд переваг перед бензиновими ДВС з свічками запалювання, вони більш економічні на 20-30%, простіші в експлуатації. Дизельні двигуни знайшли широке розповсюдження в автотранспортних засобах: вантажівки, легкові автомобілі, автобуси, будівельних, дорожніх машинах: грейдери, екскаватори, котки, сільськогосподарській техніці: трактори,

комбайни, сіялки; військовій техніці; різноманітних насосах газів і рідин; дизель-генераторів для виробляння електричної енергії і т.д. Якщо взяти порівняльні дані щодо викидів забруднюючих речовин з відпрацьованих газів дизельних і бензинових двигунів, Таблиця 1, то видно, що загалом на 1 кг спаленого палива дизельний двигун фактично викидає на порядок менше шкідливих речовин: оксиду вуглецю (CO), вуглеводнів (C_nH_m), оксидів азоту (NO_x), але майже в 10 разів більше викидається твердих суспендованих частинок – сажі [1]. Головна небезпека сажі, що розвинені поверхні сажевих частинок досягають значних розмірів, 1 г сажі має сумарну поверхню 75 $м^3$ [2]. Утворення сажі являє собою процес термічного розкладу палива. Загалом тверді частинки складаються із сажі, золи, сульфатів, абразивно зносних частинок. Детально механізми утворення сажових частинок розглянуто у відповідних дослідженнях зарубіжних і вітчизняних розробників [2,3,4]. Таким чином, збільшення кількості автомобілів з дизельними двигунами приводить до збільшення забруднення довкілля, тому контроль димності у відпрацьованих газах дизелів є міжнародною проблемою, відповідно є міжнародні національні стандарти, які регламентують норми димності [5.6]. Контроль викидів ТСЧ виконується за допомогою спеціальних засобів вимірювальної техніки – вимірювачів димності (димомірів).

Аналіз і постановка задачі

Згідно українського стандарту [6]:

- димність відпрацьованих газів двигуна автомобіля – показник, який характеризує ступінь поглинання світлового потоку, що просвічує відпрацьовані гази двигуна автомобіля;
- натуральний показник ослаблення світлового потоку K, $м^{-1}$ (absorption coefficient) – величина, обернена товщині шару відпрацьованих газів, проходячи який потік випромінювання від джерела світла димоміра ослаблюється в e разів;
- коефіцієнт ослаблення світлового потоку N, % – ступінь ослаблення світлового потоку внаслідок поглинання і розсіювання світла відпрацьованими газами під час проходження ними робочої труби димоміра.

Відомий метод вимірювання димності – метод «Bosch», у якому визначається ступінь почорніння спеціального білого фільтрувального паперу, коли через нього прокачують визначений об'єм проби відпрацьованого газу. Градуювання шкали димоміра виконується фотоколориметром із застосуванням стандартних зразків. Метод трудомісткий, який не можна застосовувати в режимі вільного прискорення дизельного двигуна, тому згаданий метод «Bosch» має обмежене застосування.

Згідно вимог міжнародних стандартів [6,7,8] вимірювачі димності (димоміри) повинні бути побудовані на вимірювання ступеня поглинання відпрацьованими газами світлового потоку, визначеної довжини хвилі світла, в фіксованій частині спектру. Так званий метод «Hartridge». При такій побудові димоміра для вимірювання ступеня поглинання відпрацьованими газами світлового потоку довжини хвилі світла, виникають проблеми нестабільності коефіцієнта перетворення димоміра в цілому внаслідок старіння оптичних елементів схеми (джерело і приймач випромінювання, лінзи, віддзеркалювачі), впливу температури і вологості у вимірювальній камері. Виникає необхідність вдосконалення структурної схеми димоміра для стабілізації коефіцієнта перетворення димоміра. Димність відпрацьованих газів дизельного двигуна залежно від типу палива і конструкції наведені в таблиці 1 [6].

Таблиця 1 – Нормативи димності

Автомобілі	Гранично допустимий показник ослаблення світлового показника, $К_{доп}$, $м^{-1}$	Гранично допустимий коефіцієнт ослаблення світлового потоку, $N_{доп}$, %
Автомобілі з дизелями - без наддуву	2,5	66
- з наддувом	3,0	73
Автомобілі з газодизелями: - без наддуву	1,7	52
- з наддувом	2,0	58

Димність дизельних двигунів визначають за показником (коефіцієнтом) ослаблення світлового потоку, при поглинанні відпрацьованими газами світлового потоку випромінювання від

джерела випромінювання світла (що утворює паралельний пучок) у вимірювальній камері димоміра використовуються дві системи одиниць вимірювання димності [6]:

– натуральний показник (коефіцієнт) поглинання K, м$^{-1}$;

– лінійний показник (коефіцієнт) поглинання N, %.

Натуральний показник (коефіцієнт) поглинання K, м$^{-1}$ **(**light absorption coefficient or absorption coefficient) величина, обернена товщині шару відпрацьованих газів, проходячи потік випромінювання від джерела світла димоміра ослаблюється в ***e*** разів:

(1)

де: Φ - світловий потік від джерела світла димоміра, який фіксує фотоприймач після проходження світлового потоку через відпрацьовані гази у вимірювальній камері димоміра;

Φ_o - світловий потік від джерела світла димоміра, який фіксує фотоприймач після проходження потоку крізь чисте повітря у вимірювальній камері димоміра, незаповненій відпрацьованими газами.

Лінійний показник (коефіцієнт) поглинання N, % (linear absorption coefficient or opacity) вимірює ступінь ослаблення потоку випромінювання у % від джерела світла димоміра на відстані, що дорівнює ефективній фотометричній базі димоміра, внаслідок поглинання і розсіювання світла відпрацьованими газами у вимірювальній камері димоміра:

$$N = 100 \times \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_o}\right). \qquad (2)$$

Залежність натурального показника поглинання K від лінійного показника N наведена на рис. 1, числова перерахункова таблиця K в N наведена у додатку до ДСТУ 4276-04 [6].

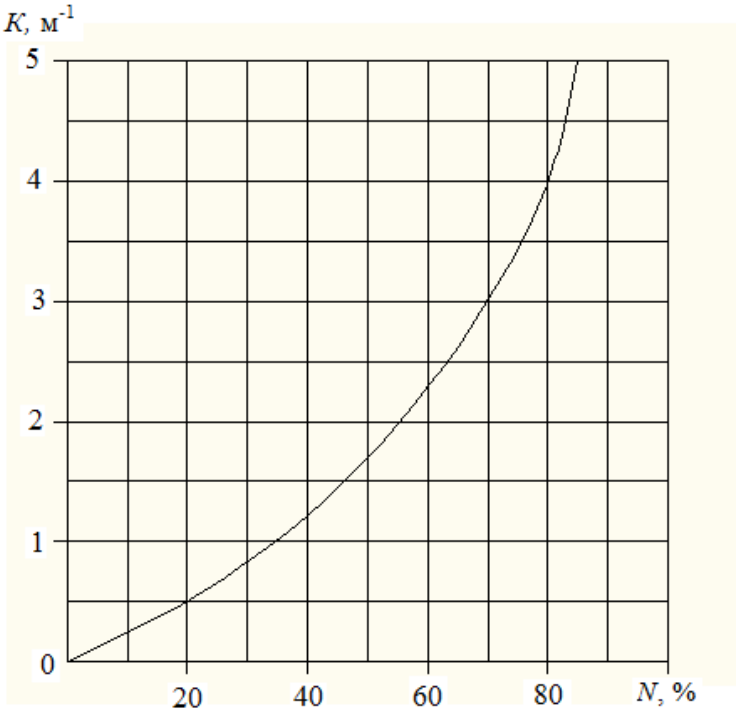

Рис. 1 – Залежність між натуральним показником ослаблення світлового потоку K і коефіцієнтом ослаблення світлового потоку N

Перерахунок значень N в K здійснюється за формулою [3]:

(3)

де K – натуральний показник ослаблення світлового потоку, м$^{-1}$; L – ефективна база димоміра, м; N – коефіцієнт ослаблення світлового потоку, %.

З метою уніфікації результатів контролю димності на міждержавному рівні стандарти жорстко фіксує вимоги до технічних, метрологічних параметрів вимірювачів димності. Основні вимоги до конструкції димомірів представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні вимоги до конструкції димомірів

№	Основні блоки димоміра	Технічні вимоги до блоків димоміра
1	Джерело випромінювання	Лампа розжарювання з температурою випромінювання в інтервалі від 2800 К до 3250 К (відповідно до стандарту CIE S 001) або зелений світлодіод з амплітудою спектра в інтервалі від 550 нм до 570 нм.
2	Приймач випромінювання	Фотоприймач (фотодіод), при необхідності із світлофільтром). При цьому характеристика спектральної чутливості фотоприймача повинна бути подібною до характеристики максимальної чутливості людського ока у діапазоні від 550 нм до 570 нм, менше ніж 4 % від максимальної чутливості, при довжині хвилі світлового потоку менше ніж 430 нм і більше ніж 680 нм.
3	Вимоги до конструктивного виконання і схеми вимірювача димності	Конструкція вимірювача димності повинна забезпечувати: - паралельність ліній світлового потоку, допускається кутове відхилення світлового потоку від оптичної осі не більше ніж 3°; - відсутність впливу на фотоприймач прямого або відбитого світлового випромінювання з кутом нахилу світлового потоку до оптичної осі більше ніж 3°. - регулювання електричних характеристик джерела випромінювання і приймача випромінювання для можливості встановлення нульового показу на шкалі вимірювача димності випадку, при проходженні світлового потоку через зону вимірювання, заповнену чистим повітрям – калібрування нуля шкали; - передбачити можливість індикації показників з від'ємним знаком і показників за верхньою межею вимірювальної шкали; - необхідно передбачити можливості перевіряння вимірювача димності з застосуванням екрану або світлофільтру з нейтральною оптичною густиною, встановлений перпендикулярно світловому променю, при димності відпрацьованих газів у межах від 15 % до 80 % повної шкали, відомої з похибкою не більше ±1 % при вимірюванні димності.
4	Вимірювальні перетворювачі в вимірювальній камері	Вимірювач димності повинен мати первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП) для вимірювання параметрів в вимірювальній камері, зазначені нижче: 1) Тиск відпрацьованих газів на вході вимірювальної камери або у вимірювальній камері; 2) Температура в точці контролю, заданій виробником як точка для вимірювання температури відпрацьованих газів; 3) Тиск продувального повітря (якщо необхідно); 4) Температура відпрацьованих газів перед перепускним клапаном (якщо перепускний клапан передбачений); 5) Напруга електроживлення лампи джерела світла (напруга не контролюється, якщо використовується зелений світлодіод); 6) Вихідний сигнал приймального пристрою (наприклад, сигнал, пропорційний димності відпрацьованих газів).

Міжнародні вимоги до технічних, метрологічних характеристик вимірювачів димності, з одного боку, уніфікують вимоги до конструкції, технічних і метрологічних характеристик вимірювачів димності і забезпечують єдність вимірювань відпрацьованих газів дизельних двигунів в більшості країн, з іншого боку, обмежують можливості розробників, конструкторів вимірювачів димності у можливості поліпшити метрологічні характеристики вимірювачів димності, бо досить складно обійти усі вищенаведені вимоги до схеми і конструкції вимірювачів димності.

Основним недоліком відомого методу є інструментальна похибка вимірювання, яка виникає внаслідок дії високотоксичного відпрацьованого газу дизеля на оптичні елементи вимірювача димності: джерел випромінювання, лінз, віддзеркалювачів, фотоприймача, тобто виникає штучне старіння згаданих оптичних елементів, і, як наслідок, виникає залежність результату вимірювання від зміни (коливань) коефіцієнта перетворення вимірювача димності, знижується чутливість, збільшується похибка вимірювань вимірювачів димності.

Виклад основного матеріалу

Типова структурна схема оптичного димоміра представлена на рисунку 2. Відпрацьовані гази дизельного двигуна надходять у вимірювальну камеру димоміра. З торців камери один навпроти одного розташовані джерело і приймач потоку світла (фотодіод). Відстань між джерелом випромінювання і приймачем світла фотометрична, нормована – 0,43 м. Джерело випромінювання та світлодіода повинні мати спектральну характеристику, відповідну кривій людського ока в інтервалі від 430 до 680 нм. Залежно від непрозорості диму – димності проби зменшується ступінь проходження світла, який попадає на фотодіод. Сигнал фотодіода, пропорційний ступеню поглинання однорідного за щільністю диму, визначає концентрацію димності дизельного двигуна.

Конструктивно оптичні елементи схеми захищені від забруднень примусовим обдувом джерела і приймача за допомогою повітря, яке подається через спеціальний клапан.

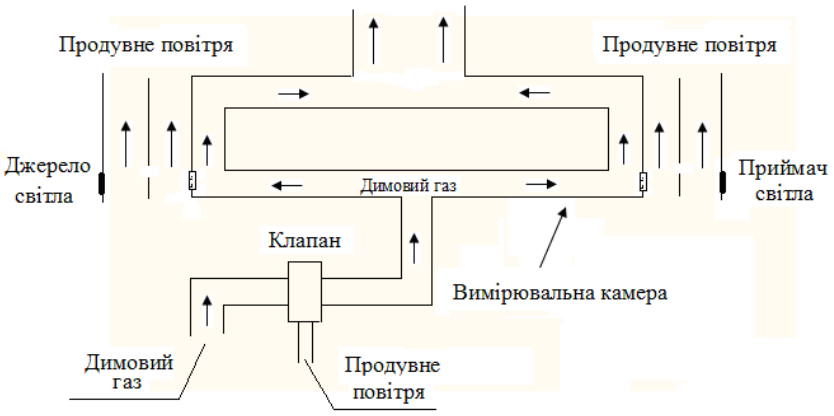

Рис. 2 – Структурна схема димоміра

Метод просвічування використовується у димомірах: ІНА-109, ИДП-2 (Україна), а також зарубіжних: Бош моделі RTT 100/100 (Німеччина), димомір Opacilit 1020 (Німеччина), 409, 435, 437 фірми AVL (Австрія) [2,4]. Робота схеми суттєво залежить від старіння елементів оптичної схеми, які постійно знаходяться під дією високотоксичного відпрацьованого газу дизельного двигуна з температурами вище 200 °С. Коефіцієнт перетворення оптичної схеми димоміра має тенденцію до змін, коливань від номінальних значень, нестабільності і відповідно збільшення похибки вимірювань димоміра. З метою зменшення розмірів і габаритів димомірів окремі виробники застосовують дзеркала або розрахунковим методом результат вимірювань приводять до фотометричної бази 0,43 м. У димоміра МЕТА – 01МП фотометрична база дорівнює 0,215 м, а приведення її до нормованого значення – 0,43 м, відбувається розрахунковим методом, шляхом використання мікропроцесора, який за заданою програмою перераховує результат вимірів до бази 0,43 м (рисунок 2) [2,4]. Принцип роботи приладу оснований на вимірюванні величини поглинання світлового потоку в вимірювальній камері димоміра і врахування температури відпрацьованого газу [2]. Димомір виконаний у вигляді переносного пристрою, що складається з вимірювальної камери, оптичних елементів, пробозабірника, мікропроцесора. У вимірювальній камері 5 розташований термодатчик 7, призначений для вимірювання температури дизельних газів. Лінза 2 формує потік випромінювання джерела випромінювання лампи 1, світлофільтр забезпечує спектральні властивості оптичної пари джерело – приймач випромінювання, відповідні чутливості людського ока. Захисні шторки – діафрагми 6 створюють захист оптичних елементів від забруднення сажею. Вимірювальні сигнали від температурного датчика 7 і з фотоприймача 3 надходять на аналогові входи мікропроцесора 8, де виконується обробка вимірювальних сигналів відповідно до програми, яка записана в ПЗУ мікропроцесора. Дані вимірювань і супровідна інформація транслюються на дисплеї 9 і на принтері

10. Живлення димоміра здійснюється від акумуляторної батареї 11. У приладі реалізується: автоматична фіксація і зберігання амплітудних значень димності в циклі випробувань двигуна, вибору чотирьох останніх значень, обчислення середнього значення; автоматична реєстрація і зберігання результатів вимірювання димності в режимі максимальної частоти обертання валу дизельного двигуна; вимірювання, автоматична корекція результатів за температурою дизельних газів; виведення результатів вимірювання димності у вигляді протоколу на принтер або в базу комп'ютера.

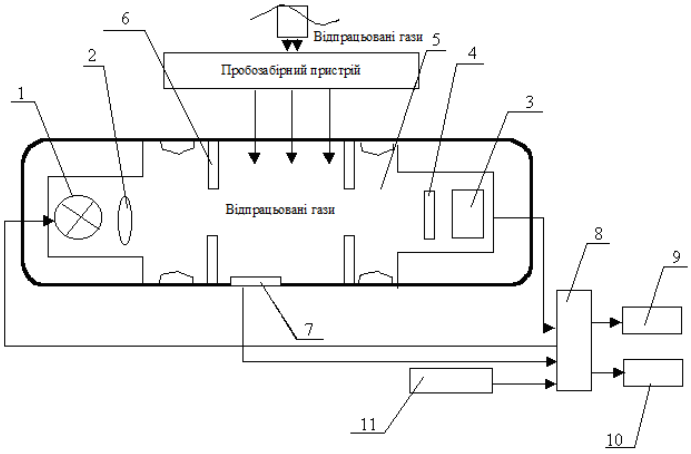

Рис. 3 – Схема функціональна вимірювача димності відпрацьованих газів МЕТА-01МП: 1 – лампа розжарювання; 2 – лінза; 3 – фотоприймач; 4 – світлофільтр; 5 – вимірювальна камера; 6 – захисні шторки – діафрагми; 7 – датчик температури; 8 – мікропроцесор; 9 – дисплей; 10 – принтер; 11 – акумуляторна батарея.

Недоліком типової структурної схеми димоміра є інструментальна похибка вимірювання, яка виникає внаслідок старіння джерел випромінювання, фотоприймача, інших оптичних елементів схеми, тобто виникає залежність результату вимірювання від зміни коефіцієнта перетворення димоміра.

На рис. 4 наведена вдосконалена нова інваріантна структурна схема димоміра, яка компенсує старіння елементів оптичної схеми димоміра під дією високотемпературного високотоксичного відпрацьованого газу дизельного двигуна [9].

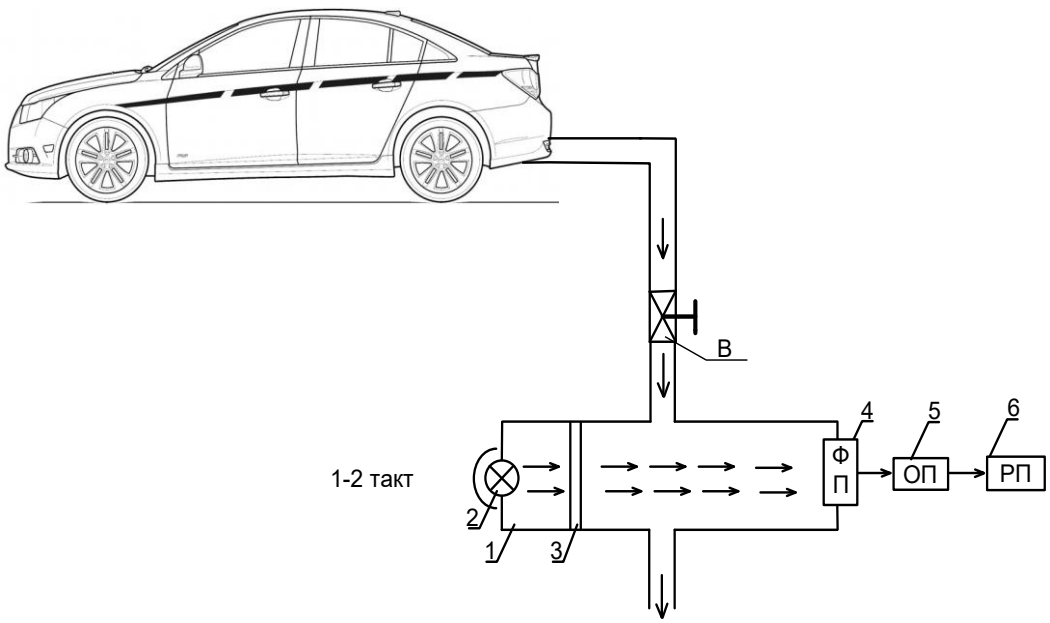

Рис. 4 – Інваріантна структурна схема димоміра з калібрувальним фільтром: 1- вимірювальна камера димоміра, 2- джерело випромінювання, 3- калібрувальний оптичний фільтр затемнення, 4- фотоприймач, 5 – обчислювальний пристрій, 6- реєструючий пристрій, В- вентиль.

В першому такті вимірювання відпрацьований газ з автомобіля в вимірювальній кюветі 1 не подається, вентиль «В» на трубопроводі від вихлопної труби автомобіля до вимірювальної камери 1 димоміра закритий. При цьому проводиться вимірювання поглинання світлового потоку від джерела випромінювання 2 калібрувальним оптичним фільтром 3, який встановлений в вимірювальній камері 1 перпендикулярно світловому потоку від джерела 2.

Світловий потік проходить від джерела 2 через попередньо метрологічно атестований калібрувальний оптичний фільтр затемнення 3 з фіксованим відомим значенням затемнення-X_o.

На фотоприймачі 4 формується електричний сигнал $N_1=KX_0$, пропорційний концентрації X_0 калібрувального оптичного фільтру, де К коефіцієнт перетворення вимірювальної схеми димоміра. Сигнал N_1 надходить до обчислювального пристрою 5, де і фіксується.

У другому, основному вимірювальному роботи димоміра вентиль В відкривається і в вимірювальну камеру 1, де встановлений калібрувальний оптичний фільтр затемнення 3, направляють відпрацьований газ з вихлопної труби автомобіля з концентрацією димності X_1.

В обчислювальному пристрою 5 фіксується результат вимірювання $N_2=K(X_1+X_o)$ – який вимірює рівень ослаблення світлового потоку від джерела випромінювання за рахунок сумарної дії концентрації X_1 димності відпрацьованого газу дизельного двигуна і калібрувального оптичного фільтру 3 з фіксованим значенням затемнення – X_o. Сигнал N_2 надходить до обчислювального пристрою 5. Де вирішується система рівнянь:

(4)

відносно визначення концентрації димності X_1:

$$X_1 = \frac{(N_2 - N_1)\cdot X_0}{N_1} \quad (5)$$

Результат обчислення виводиться на реєструючий пристрій 6.

Модифікація схеми рисунку 4 представлена на рисунку 5 [10]. В структурній схемі по рисунку 4 в вимірювальній камері 1 на поворотній осі 7 встановлюють оптичний калібрувальний фільтр 3.

Оптичний калібрувальний фільтр 3 на поворотній осі 7 може розміщуватись як паралельно світловому потоку від джерела випромінювання 2, тобто калібрувальний фільтр не впливає на проходження від джерела випромінювання 2 до фотоприймача, так і перпендикулярно світловому потоку від джерела випромінювання 3 і повністю поглинати світловий потік від джерела 2.

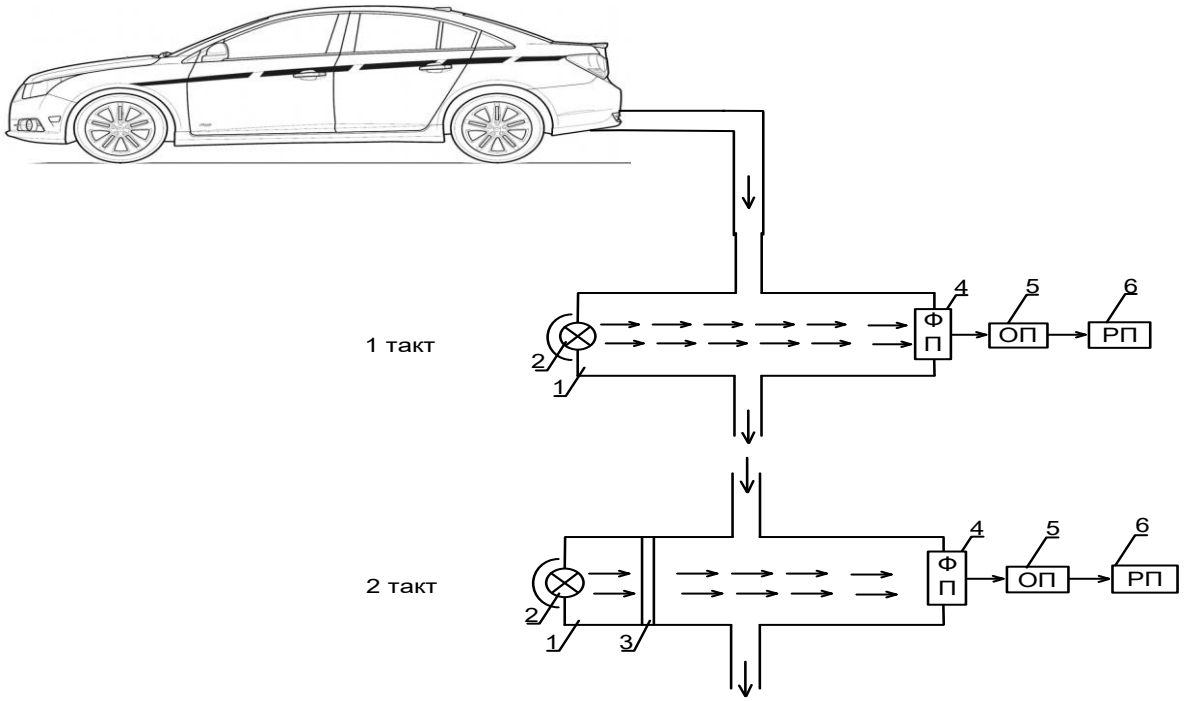

Рис. 5 – Структурна схема димоміра з двома вимірювальними камерами: 1- вимірювальна камера димоміра, 2- джерело випромінювання, 3-фотоприймач, 4 – обчислювальний пристрій, 5- реєструючий пристрій, 6- калібрувальний оптичний фільтр затемнення.

Вимірювання проводять у два такти. В першому такті вимірювання3 оптичний калібрувальний фільтр 3 на поворотній осі 7 розміщується паралельно світловому потоку від джерела випромінювання 2, на відпрацьований газ в вимірювальній кюветі 1 направляється потік світла від джерела випромінювання 2. Світловий потік проходить від джерела 2 через відпрацьований газ. Залежно від концентрації димності X_1 в відпрацьованому газі на фотоприймач (ФП) 4 надходить зменшений світловий потік від джерела випромінювання 2. На фотоприймачі 4 формується електричний сигнал, пропорційний концентрації X_1 димності $N_1=K X_1$, де К коефіцієнт перетворення димоміра, який далі надходить до обчислювального пристрою 5 і фіксується реєстратором 6.

У другому такті вимірювання оптичний калібрувальний фільтр 3 на поворотній осі 7 розміщується перпендикулярно світловому потоку від джерела випромінювання 2. В обчислювальному пристрою 5 фіксують з фотоприймача 3 сигнал $N = K(X_1 + X_o)$. X_1+X_o рівень ослаблення за рахунок сумарної дії в концентрації X_1 димності відпрацьованого газу дизельного двигуна і оптичного калібрувального фільтру 3. Сигнал N_2 надходить до обчислювального пристрою 5, де обчислюється система рівнянь:

(6)

відносно визначення концентрації димності викидів дизельного двигуна X_1:

$$X_1 = \frac{N_1 \cdot N_0}{N_2 - N_1} \qquad (7)$$

При визначенні концентрації X_1 по інваріантним схемам 5 і 6 і відповідно по формулам 5 і 7 відхилення коефіцієнта перетворення К взаємно компенсується.

Висновки

Розглянуті розроблені схеми забезпечують інваріантність вимірювання димності X_1 від дестабілізуючих факторів, відхилення коефіцієнта перетворення К димоміра від номінального значення не приводять до похибки вимірювання. По суті похибка вимірювань димоміра визначається інструментальною похибкою виготовлення і метрологічної атестації калібрувального оптичного фільтру затемнення 3. При цьому зміни коефіцієнта перетворення димоміра внаслідок старіння джерела випромінювання, інших дестабілізуючих чинників: температура, тиск, компенсуються за рахунок використання калібрувального оптичного фільтру і алгоритму обробки результат вимірювання у двох тактах, підвищується точність, зменшується похибка вимірювання.

Експериментальні дослідження показали, що основна приведена похибка вимірювань димоміра знижується з 2% до 0,5% і фактично визначається інструментальною похибкою виготовлення і визначення ступеня затемнення калібрувального оптичного фільтру.

Метрологічне забезпечення для вимірювачів димності відпрацьованих газів являє собою комплекс організаційних та технічних заходів і здійснюється відповідно до «Методики повірки», яка входить в комплект приладу. Основні проблеми метрологічного забезпечення димомірів потребує суттєвого доопрацювання. Насамперед це стосується до визначення ефективної фотометричної бази приладу, від величини якої значно залежить результат вимірювань.

Стандартна методика, що дозволяє визначити відповідність заявленим розробником димоміра величини ефективної фотометричної бази її фактичного значення при вимірюванні димності, відсутня. Спектральна характеристика приладу повіряється за допомогою нейтральних (в діапазоні 400-700 нм) світлофільтрами.

Література

[1] O. Klymenko, V. Ustymenko, K. Kolobov, S. Rychok, M. Gora, N. Naumenko. Analysis of Emissions in the European Driving Cycle of Used LightDuty Vehicles Imported to Europe from North America. SAE International Journal of Sustainable Transportation, Energy, Environment, & Policy, Issue 1 (1), Pages 1- 20, 2019, DOI: 10.4271/13-01-01-0001

[2] Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах.

Т. 5. Екологізація ДВЗ [Текст] / За ред. проф. А. П. Марченка та проф. А. Ф. Шеховцева. – Харків: Прапор, 2004.-360с.

[3] Marchenko A.P. Internal combustion engines: A series of textbooks in 6 volumes. Environmentalization [Text] / Ed. prof. A.P. Marchenko and prof. A.F. Shkhovtseva. - Kharkiv: Flag, 2004.- 360p.

[4] О.А.Клименко, В.С.Устименко, К.С.Колобов, С.О.Ричок, М.Д.Гора, Н.О.Науменко. Аналіз результатів досліджень викидів забруднювальних речовин легковими автомобілями, що були в користуванні, та імпортовані в Україну з США. «Автошляховик України», 2019, № 1 (257). – с. 2-11

[5] Гутаревич Ю.Ф. Екологія та автомобільний транспорт [Текст] /Ю.Ф. Гутаревич, Д.В. Зеркалов, А.Г.Говорун, А.О. Корпач, Л.П. Мержиєвська. Навчальний посібник. – К.: Арістей, 2006.- 292с. Gutarevich Y.F. Ecology and road transport [Text] / Y.F. Gutarevich, D.V.Zerkalov, A.G. ovorun, A.O. Korpach, L.P. Merzhievskaya, Tutorial. - K.: Ariste, 2006.- 292p.

[6] ДСТУ UN/ECE R 24-03:2002 Єдині технічні приписи

[7] ДСТУ України 4276:2004 Норми і методи вимірювань димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями

[8] Міжнародний стандарт ISO 3929:2003. Road vehicles – Measurement methods for exhaust gas emissions during inspection or maintenance (Колісні транспортні засоби. Методи вимірювання шкідливих газових викидів під час технічного контролю чи технічного обслуговування /[Текст]/2003The international standard ISO 3929: 2003. Road vehicles - Measuring methods for exhaust gas during inspection or maintenance / / Text / 2003

[9] Приміський І.В. Спосіб вимірювання димності [Текст] Патент України на винахід № 110167, Опубл. 25.11.2015. Бюл. №22. Primís'kiy I.V. Method of measuring smoke [Text] / Patent of Ukraine for invention. №. 110167, Pub. November 25, 2015 art. №. 2

[10] Приміський І.В. Спосіб автоматичного вимірювання димності дизельних двигунів[Текст]/ Патент України на винахід №108827. Опубл 10.06 2015. Бюл. 11, 2015Primís'kiy I.V . The process of automatic visibility of diesel engines [Text] / The patent of Ukraine on wine №108827. It is published on 10.06.2015. art. 11. 2015/