

УДК 389.14:629.43

В.В. Мержиєвська

Національний транспортний університет, Київ
ДП «ДержавтотрансНДІпроект», Київ, Україна

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ ПІД ЧАС СТЕНДОВОГО ВИПРОБОВУВАННЯ

Під час випробовування транспортних засобів та їхніх складових частин, вимірюють велику кількість параметрів, в різних режимах роботи, їх кількість може сягати кількох десятків. Усі ці параметри є випадковими величинами, тому мають певні характеристики точності – невизначеності. Під час випробовування двигунів характерними є такі типи невизначеності: похибки засобів виміральної техніки; невизначеності констант, коефіцієнтів та поправок; зчитування показів з аналогової шкали приладів. Під час оцінювання невизначеності вимірювання не потрібно намагатись оцінити усі впливові фактори, а лише необхідні і достатні, які суттєво впливають на результат випробовування.

Ключові слова: невизначеність, випробовування двигунів, викидні гази, джерела невизначеності.

Вступ

Постановка проблеми На сьогодні, у сфері дослідження, експлуатації та контролювання функціонування транспортних засобів та їхніх складових частин, зокрема, двигунів внутрішнього згорання (далі – ДВЗ) поширений класичний підхід в оцінюванні якості результатів вимірювань. Класичний підхід ґрунтується на понятті «похибка». Наразі його вважають застарілим, оскільки він не відповідає сучасним вимогам науки і техніки. До того ж виникла потреба у визнанні і забезпеченні порівнюваності результатів вимірювання на міжнародному рівні, особливо у сфері контролювання забруднення довкілля і змін клімату [1]. Постійно підвищують вимоги до рівня точності, враховують усе більшу кількість факторів: у «класичній» метрології за останні 50 років необхідний рівень точності підвищився в 10 разів, і ця тенденція утримується [2].

Аналіз літератури. Нажаль, на сьогодні публікацій щодо оцінювання невизначеності вимірювання в сфері автомобільного транспорту бракує. Нормативні документи щодо методів випробовування ДВЗ, здебільшого, не передбачають оцінювання невизначеності вимірювання, тому практичне оцінювання невизначеності вимірювання під час випробовування ДВЗ є доволі складним.

Настанови щодо вираження невизначеності вимірювання [3] є надто загальними і їх складно застосовувати практично. Частково питання оцінювання невизначеності вимірювання параметрів ДВЗ дозволили вирішити рекомендації Eurachem для аналітичних вимірювань [4].

Метою статті є запропонувати підхід до оцінювання невизначеності вимірювання під час випробовування ДВЗ, зумовити подальше обговорення цього питання для формування методики оцінювання невизначеності в сфері дослідження і контролю-

вання параметрів автомобільного транспорту.

Основний матеріал

Особливості випробовування ДВЗ та характерні типи невизначеності. Випробовування транспортних засобів та їхніх складових частин є доволі трудомісткими. Під час випробовування визначають велику кількість параметрів, в різних режимах роботи, їх кількість може сягати кількох десятків. Усі параметри, які вимірюють під час проведення випробовування ДВЗ, є випадковими величинами, тому мають певні характеристики точності – невизначеності.

Оцінюють невизначеність для кожної отриманої точки, кожної вимірної величини, тому автоматизація розрахунків є, практично, необхідною. Для обробки результатів випробовування ДВЗ і оцінювання невизначеності, здебільшого, достатньо стандартного програмного забезпечення, наприклад Microsoft Excel.

Під час проведення випробовування двигунів характерними є такі типи невизначеності: похибки засобів виміральної техніки (далі – ЗВТ); неточності констант, коефіцієнтів та поправок; невизначеність зчитування показів з аналогової шкали приладу.

Похибки ЗВТ, як правило, зазначені у паспорті устаткування. Для оцінювання невизначеності, спричиненої похибками ЗВТ приймають рівномірний закон розподілу:

$$u_B = \frac{b}{t}, \quad (1)$$

де b – напівширина інтервалу; $t = 1,6$ – аналог коефіцієнта Лапласа для рівномірного закону.

Для констант, коефіцієнтів та поправок інтервалами розсіяння є одиниця найменшого розряду їхніх числових значень, тому невизначеність обчис-

люють за формулою:

$$u_B = \frac{q}{2\sqrt{3}}, \quad (2)$$

де q – одиниця найменшого розряду числового значення.

Для оцінювання невизначеності зчитування показів з аналогової шкали приймають рівномірний закон розподілу, тоді:

$$u_B = \frac{\left(x + \frac{q}{4}\right) - \left(x - \frac{q}{4}\right)}{2\sqrt{3}} = \frac{q}{4\sqrt{3}}, \quad (3)$$

де x – виміряне значення величини; q – ціна поділки шкали приладу.

Якщо шкала нерівномірна, невизначеність оцінюють окремо для кожного діапазону, для якого визначена ціна поділки.

Оцінювання невизначеності вимірювання густини повітря. Для прикладу оцінювання невизначеності вимірювання параметрів ДВЗ, розглянемо оцінювання невизначеності вимірювання густини повітря, оскільки вона є складовою формули для обчислення коефіцієнту наповнення циліндрів, а також, якщо вимірювання витрати повітря здійснюють об'ємним методом, – складовою формули перерахунку витрати повітря в масові одиниці. Годинна витрата повітря, в свою чергу, входить у формули для обчислення коефіцієнту надміру повітря α , кількості викидних газів для обчислення масових викидів КТЗ. Тому оцінка невизначеності густини повітря буде складовою для оцінювання невизначеності багатьох інших показників.

Оцінювання невизначеності густини повітря:

1. Значення густини повітря отримують в результаті непрямого вимірювання. Рівняння вимірювання:

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{p_0[\text{кПа}] \cdot 10^3}{R \cdot (t[^\circ\text{C}] + 273,15)} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right], \quad (3)$$

де $R = 287 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ – газова стала повітря.

2. Результати прямого вимірювання вхідних величин:

– Атмосферний тиск: $p_0 = 100,9$ кПа;

– Температура повітря: $t = 25$ °С;

3. Результат вимірювання густини повітря:

– Густина повітря: $\rho_{\text{пов}} = 1,178 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

4. ЗВТ та їхні метрологічні характеристики:

– Барометр-анероїд НД-49-А, похибка ± 67 Па;

7. Рівняння залежності невизначеності густини повітря від невизначеностей вихідних величин:

$$u_C(\rho_{\text{пов}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial p_0}\right)^2 \cdot u_B^2(p_0) + \left(\frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial t}\right)^2 \cdot u_B^2(t) + u_B^2(R) + u_B^2(\text{СК})} \quad (12)$$

– Ртутний термометр, похибка $\pm 0,1$ °С.

5. Стандартні невизначеності типу В величин, що входять в рівняння:

5.1 Невизначеність температури повітря:

– Інструментальну невизначеність обчислюють за формулою (1), напівширина інтервалу $b = 0,1$ °С:

$$u_B(t_{\text{ЗВТ}}) = \frac{b}{t} = \frac{0,1}{1,6} = 0,0625 \text{ °С}. \quad (4)$$

– Суб'єктивну невизначеність визначають за формулою (3), ціна поділки $q = 1$ °С:

$$u_B(t_{\text{зч}}) = \frac{q}{4\sqrt{3}} = \frac{1}{4\sqrt{3}} = 0,1443 \text{ °С}. \quad (5)$$

– Невизначеність температури повітря:

$$u_B(t) = \sqrt{u_B^2(t_{\text{ЗВТ}}) + u_B^2(t_{\text{зч}})} = \sqrt{0,0625^2 + 0,1443^2} = 0,1573 \text{ °С}. \quad (6)$$

5.2 Невизначеність атмосферного тиску:

– Інструментальну невизначеність обчислюють за формулою (1), напівширина інтервалу $b = 0,067$ кПа:

$$u_B(p_{\text{0ЗВТ}}) = \frac{b}{t} = \frac{0,067}{1,6} = 0,0419 \text{ кПа}. \quad (7)$$

– Суб'єктивну невизначеність визначають за формулою (3), ціна поділки $q = 0,1$ кПа:

$$u_B(p_{\text{0зч}}) = \frac{q}{4\sqrt{3}} = \frac{0,1}{4\sqrt{3}} = 0,0144 \text{ кПа}. \quad (8)$$

– Невизначеність температури повітря:

$$u_B(p_0) = \sqrt{u_B^2(p_{\text{0ЗВТ}}) + u_B^2(p_{\text{0зч}})} = \sqrt{0,0419^2 + 0,0144^2} = 0,0443 \text{ °С}. \quad (9)$$

5.3 Невизначеність газової сталої повітря обчислюють за формулою (1), одиниця найменшого розряду $q = 0,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$:

$$u_B(R) = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,0289 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (10)$$

5.4 Невизначеність перерахунку температури з градусів Цельсія в градуси Кельвіна, одиниця найменшого розряду $q = 0,01$ К:

$$u_B(\text{СК}) = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,0029 \text{ К}. \quad (11)$$

6. Додаткові впливові фактори відсутні, або їхнім впливом можна знехтувати. Стандартні невизначеності типу В величин, що не входять в рівняння, відсутні.

8. Але, оскільки значення стандартних невизначеностей мають різну розмірність, сумувати їх не можна, необхідно звести до безрозмірних величин – відносної невизначеності:

$$\delta_B(t) = \frac{u_B(t)}{t}; \delta_B(p_0) = \frac{u_B(p_0)}{p_0}; \delta_B(R) = \frac{u_B(R)}{R}; \delta_B(CK) = \frac{u_B(CK)}{273,15}; \quad (13)$$

$$\delta_B(t) = 6,292 \cdot 10^{-3}; \delta_B(p_0) = 4,421 \cdot 10^{-4}; \delta_B(R) = 0,00010; \delta_B(CK) = 0,0000106.$$

9. Тоді, рівняння для оцінювання відносної сумарної невизначеності густини повітря матиме вигляд:

$$\delta_C(\rho_{\text{пов}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial p_0}\right)^2 \cdot \delta_B^2(p_0) + \left(\frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial t}\right)^2 \cdot \delta_B^2(t) + \delta_B^2(R) + \delta_B^2(CK)}. \quad (14)$$

10. Визначення коефіцієнтів вагомості, як перших часткових похідних від рівняння вимірювання за кожною із вхідних величин:

$$\frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial p_0} = \frac{10^3}{R \cdot (t + 273,15)}; \frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial t} = \frac{p_0 \cdot 10^3}{R} \cdot ((t + 273,15)^{-2})' \cdot (t + 273,15)' = -\frac{p_0 \cdot 10^3}{R \cdot (t + 273,15)^2}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial p_0} = 0,0000117; \frac{\partial \rho_{\text{пов}}}{\partial t} = -0,0011783.$$

11. Отже, відносна невизначеність густини повітря:

$$\delta_C(\rho_{\text{пов}}) = \sqrt{0,0000117^2 \cdot (4,421 \cdot 10^{-4})^2 + (-0,0011783)^2 \cdot (6,292 \cdot 10^{-3})^2 + 0,00010^2 + 0,0000106^2};$$

$$\delta_C(\rho_{\text{пов}}) = \sqrt{1,0167 \cdot 10^{-8}} = 0,0001008.$$

12. Тоді, сумарна невизначеність густини повітря:

$$u_C(\rho_{\text{пов}}) = \rho_{\text{пов}} \cdot \delta_C(\rho_{\text{пов}}) = 1,178 \cdot 0,0001008 = 0,0001188 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (16)$$

13. Коефіцієнт охоплення для рівномірного закону розподілу і рівня довіри $P = 0,95$ становить $k = 1,65$. Розширена невизначеність густини повітря:

$$U(\rho_{\text{пов}}) = k \cdot u_C(\rho_{\text{пов}}) = 1,65 \cdot 0,0001188 = 0,000196 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (17)$$

14. Із урахуванням правил заокруглення, результат вимірювання густини повітря:

$$\rho_{\text{пов}} = 1,1780 \pm 0,0002 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (18)$$

Основні джерела невизначеностей результатів стендового випробування ДВЗ із примусовим запалюванням

Таблиця 1

Основні джерела невизначеностей для результатів випробування двигуна із примусовим запалюванням

№	Вимірювана величина	Джерела невизначеностей		
		Інструментальна	Методична	Суб'єктивна
1	Температура, t	Похибка термометра	–	Зчитування з аналогової шкали
2	Атмосферний тиск, p_0	Похибка барометра	–	Зчитування з аналогової шкали
3	Вологість повітря	Похибка гігromетра	–	Зчитування з аналогової шкали
4	Частота обертання колінчастого валу двигуна, $n_{\text{дв}}$	Похибка частотоміра	–	–
		Заокруглення значень частоти обертання частотоміром		
5	Крутний момент, M_k	Похибка динамометра	–	Зчитування з аналогової шкали
		Коливання навантаження стенду		
6	Потужність двигуна N_e	–	Невизначеність величин, що входять у формулу (n, M_k) Невизначеність коефіцієнтів, констант, що входять у формулу	Невизначеність заокруглення
7	Розрідження за дросельними заслінками, Δp_k	Похибка манометра	Переведення в одиниці СІ	Зчитування з аналогової шкали

Невизначеність при виконанні випробувань транспортних засобів

№	Вимірювана величина	Джерела невизначеностей		
		Інструментальна	Методична	Суб'єктивна
8	Годинна витрата палива, $G_{\text{пал}}$	–	Невизначеність величин, що входять у формулу ($\Delta G_{\text{пал}}, \tau_{\text{пал}}$)	Невизначеність заокруглення
			Невизначеність коефіцієнтів, констант, що входять у формулу	
			Невизначеність величин, що не входять у формулу (густина палива, якщо пряме вимірювання витрати палива – об'ємне, наприклад для газового палива)	
	Доза палива $\Delta G_{\text{пал}}$	Похибка ваг	–	Зчитування з аналогової шкали
	Час подачі дози палива $\tau_{\text{пал}}$	Похибка секундоміра	–	Затримка під час натискання кнопок секундоміра
9	Годинна витрата повітря, $G_{\text{пов}}$	–	Невизначеність величин, що входять у формулу ($\Delta G_{\text{пов}}, \tau_{\text{пов}}$)	Невизначеність заокруглення
			Невизначеність коефіцієнтів, констант, що входять у формулу	
			Невизначеність величин, що не входять у формулу (густина повітря, якщо пряме вимірювання витрати повітря – об'ємне)	
		Доза повітря $\Delta G_{\text{пов}}$	Похибка витратоміру повітря	–
	Час витікання дози повітря $\tau_{\text{пов}}$	Похибка секундоміра	–	Затримка натискання кнопок секундоміра
10	Питома витрата палива, g_c	–	Невизначеність величин, що входять у формулу ($G_{\text{пал}}, N_c$) Невизначеність коефіцієнтів, констант, що входять у формулу	Невизначеність заокруглення
11	Коефіцієнт надміру повітря, α	–	Невизначеність величин, що входять у формулу ($G_{\text{пал}}, G_{\text{пов}}$) Невизначеність коефіцієнтів, констант, що входять у формулу (l_0)	Невизначеність заокруглення
12	Коефіцієнт наповнення циліндрів, η_v	–	Невизначеність величин, що входять у формулу ($n, V_h, G_{\text{пов}}, \rho_{\text{пов}}$)	Невизначеність заокруглення
13	Коефіцієнт надміру повітря, визначений за складом викидів, λ	–	Невизначеність величин, що входять у формулу ($\text{CO}, \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{HCs}$) Невизначеність коефіцієнтів, констант, що входять у формулу ($\text{Hcv}, \text{Ocv}, \text{K}_i$)	Невизначеність заокруглення
14	Концентрації компонентів викидів:			
14.	Оксиду вуглецю (II), CO	Похибка газоаналізатора Приписана похибка тарувальної суміші Похибка поправки ¹	Додатково враховувати невизначеність, спричинену особливостями роботи газоаналітичної апаратури не потрібно – це враховано похибками приладів, зазначеними в паспорті	Невизначеність заокруглення
14.	Оксиду вуглецю (IV), CO ₂	Похибка газоаналізатора Приписана похибка тарувальної суміші Похибка поправки ¹		Невизначеність заокруглення
14.	Вуглеводнів, HCs	Похибка газоаналізатора Приписана похибка тарувальної суміші Похибка поправки ¹	Додатково враховувати невизначеність, спричинену особливостями роботи газоаналітичної апаратури не потрібно – це враховано похибками приладів, зазначеними в паспорті	Невизначеність заокруглення
14.	Оксидів азоту, NOx	Похибка газоаналізатора Приписана похибка тарувальної суміші Похибка поправки ¹	Додатково враховувати невизначеність, спричинену особливостями роботи газоаналітичної апаратури не потрібно – це враховано похибками приладів, зазначеними в паспорті	Невизначеність заокруглення
14.	Кисню, O ₂ .	Похибка газоаналізатора Приписана похибка тарувальної суміші Похибка поправки ¹	Додатково враховувати невизначеність, спричинену особливостями роботи газоаналітичної апаратури не потрібно – це враховано похибками приладів, зазначеними в паспорті	Невизначеність заокруглення

¹ Похибка поправки, введеної на систематичну похибку газоаналізатора, виявлену за допомогою тарувальної суміші.

№	Вимірювана величина	Джерела невизначеностей		
		Інструментальна	Методична	Суб'єктивна
15	Питомі викиди компонентів:			
15.	Оксиду вуглецю (II), g_{CO}	–	Невизначеність величин, що входять у формулу (CO , $M_{BG_{сух}}$, M_{CO})	Невизначеність заокруглення
15.	Оксиду вуглецю (IV), g_{CO_2}	–	Невизначеність величин, що входять у формулу (CO_2 , $M_{BG_{сух}}$, M_{CO_2})	Невизначеність заокруглення
15.	Вуглеводнів, g_{HCs}	–	Невизначеність величин, що входять у формулу (HCs , $M_{BG_{сух}}$, M_{HCs})	Невизначеність заокруглення
15.	Оксидів азоту, g_{NOx}	–	Невизначеність величин, що входять у формулу (NOx , $M_{BG_{волог}}$, M_{NOx})	Невизначеність заокруглення
15.	Сумарні питомі викиди, g_{Σ}	–	Невизначеність величин, що входять у формулу (g_{CO} , g_{CO_2} , g_{HCs} , g_{NOx}) Невизначеність коефіцієнтів агресивності	Невизначеність заокруглення
16	Кут випередження запалювання, θ	Похибка стробоскопа	–	Зчитування з аналогової шкали
17	Кут відкриття дросельних заслінок, $\phi_{дрос}$	Люфти	Перерахунок градусів кута відкриття у %	Зчитування з аналогової шкали
18	Температура охолодної рідини, $t_{охол}$	Похибка термометра	–	Зчитування з аналогової шкали
19	Температура викидних газів, T_{BG}	Похибка термометра	–	Зчитування з аналогової шкали
20	Тиск оливи, $p_{ол}$	Похибка манометра	–	Зчитування з аналогової шкали
21	Температура оливи, $t_{ол}$	Похибка термометра	–	Зчитування з аналогової шкали
22	Тиск у випускній системі, p	Похибка системи зрівноваження тиску	–	Зчитування з аналогової шкали

Висновок

У зв'язку з тим, що вимоги світових екологічних стандартів стають дедалі жорсткішими (допустимі норми викидів шкідливих речовин за останні 30 років скорочено в 65...80 разів), тому необхідно підвищувати точність вимірювання вмісту шкідливих речовин у викидних газах ДВЗ і розробляти відповідні методики оцінювання точності вимірювання.

Список літератури

1. Закон України № 113/98-ВР від 11.02.1998 «Про метрологію та метрологічну діяльність» (зі змінами, внесеними згідно із Законом N 762-IV від 15.05.2003, в редакції Закону N 1765-IV від 15.06.2004).

2. Чалый В.П. Неопределенность и погрешность, их сходство, различие и употребление в разных метрологических процедурах // Системи обробки інформації. – Хю: ХУ ІС. – 2006. – Вип. 7(56). – С. 82-86.

3. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, IDT).

4. Eurachem/CITAC guide CG 4 «Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement» 2nd edition.

Надійшла до редколегії 29.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехін, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Мержиевская В.В.

При испытании транспортных средств и их составляющих частей, измеряют большое количество параметров, в различных режимах работы, их количество может достигать нескольких десятков. Все эти параметры являются случайными величинами с соответствующими характеристиками точности – неопределенностями. При испытании двигателей характерными типами неопределенностей являются: погрешность средств измерений; неопределенность констант, коэффициентов и поправок; считывания показаний с аналоговой шкалы приборов. При оценивании неопределенности измерений нет необходимости оценивать все влияющие факторы, а только необходимые и достаточные, которые существенно влияют на результат испытаний.

Ключевые слова: неопределенность, испытание двигателей, выхлопные газы, источники неопределенности.

EVALUATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN AUTOMOBILE ENGINE BENCH TESTS

Merzhyievska V.V.

During vehicles and their parts testing, measure the large number of parameters, in various modes. All of them are random variables with the characteristics of precision – uncertainty. In engines testing the distributed types of uncertainties are: errors of measuring tools; uncertainty of constants, ratios and amendments; uncertainty of reading the testimony from analog scale devices. The quantifying uncertainty in measurement don't need to evaluate all influencing factors, but only the necessary and sufficient factors to significantly affect the outcome of tests.

Keywords: uncertainty, test of engines, exhaust gases, sources of uncertainty.