

Piotr BIELACZYC, Andrzej SZCZOTKA, Joseph WOODBURN

ŹRÓDŁA BŁĘDÓW PRZY POMIARACH EMISJI ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH SPALIN NA HAMOWNI PODWOZIOWEJ – ANALIZA BILANSU MASY

Badania emisji związków szkodliwych spalin w testach na hamowni podwozowej są jednymi z najważniejszych i najbardziej skomplikowanych badań, jakim są poddawane samochody napędzane silnikami spalinowymi. W artykule omówiono szczegółowo jeden z najważniejszych elementów laboratorium badania emisji spalin, a mianowicie układ poboru i rozcieńczenia spalin (tzw. system CVS – Constant Volume Sample – stała objętość próbkowania) oraz przeanalizowano bilans masy w poszczególnych elementach układu CVS, który ma istotny wpływ na dokładność pomiarów emisji spalin.

WSTĘP

Badania emisji spalin pojazdów o masie całkowitej poniżej 3500 kg przeprowadza się w laboratorium badania emisji spalin (zdjęcie 1) na hamowni podwozowej (rolkowym stanowisku dynamometrycznym), odwzorowującej rzeczywiste opory jazdy (toczenia, aerodynamiczne i bezwładność pojazdu) [1,2]. Hamownia podwozowa jest urządzeniem, które odtwarza warunki ruchu na drodze rzeczywistej dla układu napędowego badanego pojazdu w warunkach laboratoryjnych.

Badanie polegające na analizie spalin (rozcieńczonych powietrzem) z worków pomiarowych jest podstawowym przy wykonywaniu badań emisji związków szkodliwych w spalinach, zgodnie z wymaganiami przepisów homologacyjnych. Badania te, nazywane często badaniami kontrolnymi, wykonuje się w ramach badań homologacyjnych (dopuszczających dany pojazd do ruchu) i badań zgodności produkcji (CoP - conformity of production - badania pojazdów wziętych losowo z produkcji seryjnej na zgodność z homologowanym typem).



Zdjęcie 1. Laboratorium Badania Emisji Spalin w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL [3]

Próbka mieszaniny spalin z powietrzem, w ilości proporcjonalnej do strumienia tej mieszaniny, jest w sposób ciągły pobierana i zbierana w worku pomiarowym, w czasie realizacji na hamowni podwozowej ustalonego cyklu jezdnego. Skład mieszaniny spalin z powietrzem w worku pomiarowym odpowiada średniemu stężeniu

składników spalin wydzielanych z pojazdu podczas określonego cyklu jezdnego. Następnie odczytane z próbki zebranej do worków pomiarowych (z użyciem analizatorów spalin) stężenia poszczególnych związków szkodliwych przelicza się na podstawie odpowiednich wzorów na emisję całkowitą w g/km i otrzymane wyniki porównuje się z odpowiednimi limitami [4].

1. OPIS SYSTEMU CVS

System próbkowania spalin o stałej objętości CVS-CFV (CFV - critical flow Venturi - układ CVS z dyszą Venturiego o przepływie krytycznym), w połączeniu z odpowiednim zestawem analizatorów umożliwia precyzyjny pomiar szkodliwych składników gazów spalinowych emitowanych z kompletnego pojazdu, podczas badań na hamowni podwozowej [5-7].

Dla każdej fazy testu emisji strumień gazów spalinowych jest rozcieńczany przez przefiltrowane powietrze z otoczenia, następnie próbka gazów spalinowych i przefiltrowanego powietrza są zbierane do worków pomiarowych wykonanych z teflaru z równoczesnym pomiarem natężenia przepływu rozcieńczonych spalin.

System poboru spalin CFV-CVS oprócz podstawowych funkcji określonych przez wymagania dotyczące pomiarów emisji spalin umożliwia także:

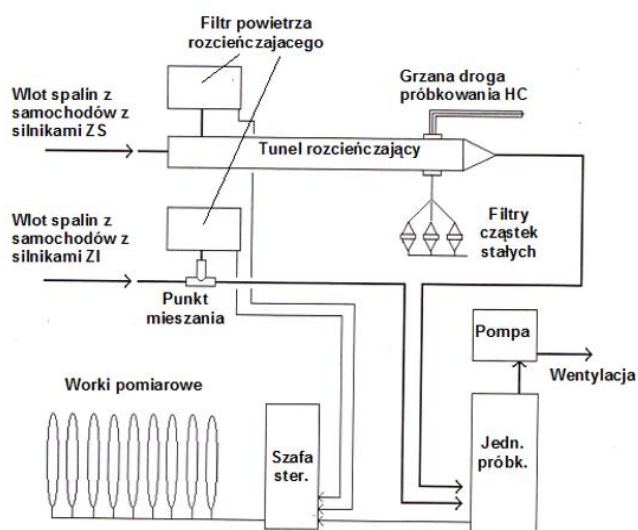
- otrzymywanie całkowitego przepływu spalin samochodowych bez wahań ciśnienia w rurze wydechowej większych od 100 mm słupa wody w porównaniu do wyników otrzymanych podczas pomiaru bez podłączonego systemu CVS,
- rozcieńczanie gazów spalinowych otaczającym powietrzem, zgodnie z żądanym współczynnikiem rozcieńczenia, tak aby w systemie pomiarowym i w systemie próbkowania nie pojawiła się woda kondensacyjna,
- próbkowanie odpowiedniej, proporcjonalnej ilości gazów spalinowych i powietrza, a następnie przesyłanie ich do worków pomiarowych,
- mierzenie całkowitego przepływu rozcieńczonych gazów w celu określenia objętości każdej fazy testu emisji.

Zasada działania systemu poboru spalin (rys. 1 i zdjęcie 2) oparta jest na przepływie krytycznym przez zwężkę Venturiego. System CVS, przy zachowaniu przepływu krytycznego przez zwężkę, zapewnia stały przepływ rozcieńczonych gazów spalinowych przez zwężkę oraz oblicza chwilowe i całkowite natężenie przepływu mieszaniny, a także całkowitą objętość mieszaniny, która przepłynęła przez układ CVS. W celu określenia natężenia przepływu

rozcieńczonych gazów spalinowych przez układ CVS na wlocie do zwężki Venturiego mierzone jest ciśnienie (za pomocą przetwornika ciśnienia) i temperatura (za pomocą opornościowego czujnika temperatury) mieszaniny. Następnie rzeczywiste natężenie przepływu i całkowita objętość korygowane są do warunków standardowych, zgodnie z wymaganiami przepisów dotyczących pomiarów emisji spalin.



Zdjęcie 2. Laboratorium Badania Emisji Spalin w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL – tunel rozcieńczający spaliny [3]



Rys. 1. Konfiguracja typowego systemu poboru spalin dla samochodów z silnikami ZI i ZS [3,8]

Próbki powietrza rozcieńczającego i rozcieńczonych gazów spalinowych są zbierane do worków pomiarowych w celu ich dalszej analizy przy użyciu zestawu analizatorów. W systemie CVS proporcjonalna objętość próbki jest uzyskiwana za pomocą zwężki Venturiego o przepływie krytycznym umieszczonej w sondzie próbkującej (zwężka próbkująca). Sonda próbkująca umieszczona jest blisko wlotu do głównej zwężki Venturiego tak, że temperatura i ciśnienie są praktycznie takie same dla obu zwężek Venturiego, co zapewnia proporcjonalną zmianę natężenia przepływu próbki w zależności od całkowitego natężenia przepływu rozcieńczonych gazów spalinowych.

Próbka powietrza rozcieńczającego jest analizowana w celu korekcyjnego stężenia składników tła wprowadzonego z powietrzem rozcieńczającym.

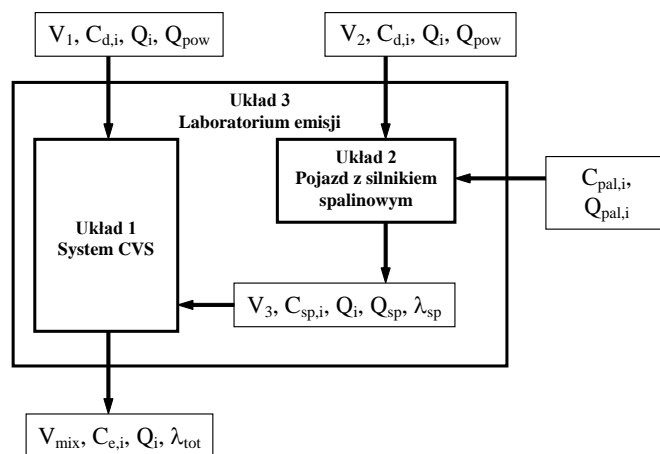
W systemie zastosowano również separator cyklonowy do usuwania cząstek stałych z rozcieńczonych gazów spalinowych oraz do dokładnego wymieszania spalin z powietrzem rozcieńczającym.

2. ANALIZA BILANSU MASY PRZY POMIARACH EMISJI NA HAMOWNI PODWOZOWEJ

W celu znalezienia źródeł błędów metody stosowanej przy pomiarach emisji związków szkodliwych z samochodów z wykorzystaniem układu CVS, wykorzystano schemat przedstawiony na rysunku 2. Analizę przeprowadzono w celu określenia wpływu na wyniki końcowe uproszczeń zastosowanych w metodzie CVS przy obliczeniach masy związków szkodliwych.

Analizę wykonano na podstawie bilansu masy składników spalin na wejściu i wyjściu każdego z poniższych układów:

- układ 1: system CVS,
- układ 2: pojazd z silnikiem spalinowym,
- układ 3: laboratorium badania emisji włącznie z pojazdem i systemem CVS.



Rys. 2. Schemat analizowanego systemu pomiarowego związków szkodliwych [9]

2.1. system CVS

Masa dowolnego składnika $m_{i,we}$ doprowadzona do układu CVS jest równa:

$$m_{i,we} = V_1 \cdot Q_i \cdot C_{d,i} + V_3 \cdot Q_i \cdot C_{sp,i} \quad (1)$$

gdzie:

- V_1 - objętość powietrza dostarczona do układu CVS,
- Q_i - gęstość i-tego składnika,
- $C_{d,i}$ - stężenie i-tego składnika w powietrzu,
- V_3 - objętość spalin nierozcieńczonych dostarczona do układu CVS,
- $C_{sp,i}$ - stężenie i-tego składnika w spalinach nierozcieńczonych.

Masa dowolnego składnika w worku pomiarowym $m_{i,wy}$ jest równa:

$$m_{i,wy} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{e,i} \quad (2)$$

gdzie:

- V_{mix} - objętość spalin rozcieńczonych,
- $C_{e,i}$ - stężenie i-tego składnika w spalinach rozcieńczonych.

Jednocześnie zgodnie z zasadą zachowania masy, niezależnie od reakcji zachodzących pomiędzy różnymi składnikami spalin i powietrza w układzie CVS, musi być spełniona równość:

$$m_{i,we} - m_{i,wy} = 0 \quad (3)$$

Niezależnie od warunków przeprowadzania testów, system CVS musi zapewniać spełnienie warunku:

$$V_3 < V_{mix} \quad (4)$$

W systemie CVS mierzone są objętość spalin rozcieńczonych oraz stężenie *i*-tego składnika w spalinach rozcieńczonych i w powietrzu. Nie są konieczne pomiary objętości powietrza dostarczonego do układu CVS, a także objętości spalin nierozcieńczonych. Wynika to z podstawienia równania (1) do wzoru (3):

$$V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{e,i} = V_3 \cdot Q_i \cdot C_{sp,i} + V_1 \cdot Q_i \cdot C_{d,i} \quad (5)$$

W systemie CVS spełniona jest zależność:

$$V_1 = V_{mix} - V_3 \quad (6)$$

a jednocześnie przekształcając równanie (5) otrzymuje się

$$V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{e,i} = V_3 \cdot Q_i \cdot C_{sp,i} - V_3 \cdot Q_i \cdot C_{d,i} + V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{d,i} \quad (7)$$

Całkowita masa dowolnego składnika szkodliwego emitowanego z silnika, dostarczona do systemu CVS jest zatem równa:

$$m_{i,1,sp} = V_3 \cdot Q_i \cdot C_{sp,i} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{e,i} - (V_{mix} - V_3) \cdot Q_i \cdot C_{d,i} \quad (8)$$

Niemierzona objętość V_3 może być zastąpiona przez stopień rozcieńczenia DR (*dilution ratio*), który jest zdefiniowany jako:

$$DR = \frac{V_{mix}}{V_3} = \frac{V_{mix}}{V_{mix} - V_1} \quad (9)$$

Dla pojazdów zasilanych silnikami spalinowymi, w celu uproszczenia pomiarów zastąpiono stopień rozcieńczenia DR, współczynnikiem rozcieńczenia DF (*dilution factor*), który jest do niego zbliżony ($DR \approx DF$ [10]). W przypadku pojazdów z silnikami zasilanymi benzyną i olejem napędowym współczynnik ten oblicza się ze wzoru:

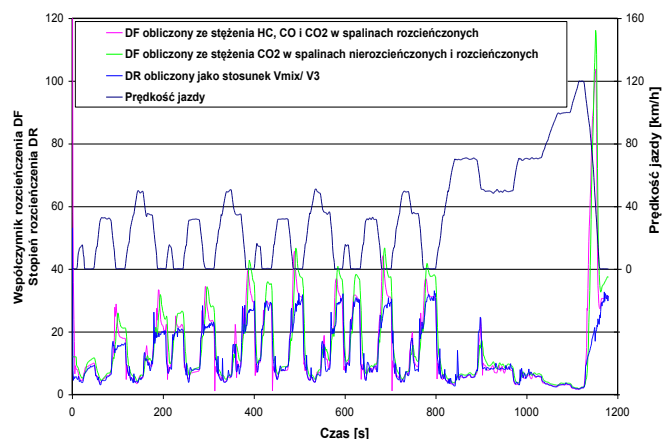
$$DF = \frac{13,4}{C_{e,CO_2} + (C_{e,HC} + C_{e,CO}) \cdot 10^{-4}} \quad (10)$$

gdzie:

- C_{e,CO_2} - stężenie CO₂ [%] w rozcieńczonych gazach spalinowych,
- $C_{e,HC}$ - stężenie HC [ppm] w rozcieńczonych gazach spalinowych,
- $C_{e,CO}$ - stężenie CO [ppm] w rozcieńczonych gazach spalinowych.

Wartość 13,4 w równaniu (10) oznacza maksymalne stężenie CO₂ w wilgotnych spalinach nierozcieńczonych dla spalania stechiometrycznego ($\lambda_s=1$). Dla silników napędzanych paliwami alternatywnymi (gaz ziemny, LPG) współczynnik rozcieńczenia jest zdefiniowany w inny sposób [4, 10, 11].

Różnicę między stopniem a współczynnikiem rozcieńczenia pokazano na rys. 3. Na rysunku tym przedstawiono zmianę wartości tych parametrów podczas cyklu jezdny NEDC. Wartość współczynnika rozcieńczenia DF obliczono dwoma metodami: na podstawie stężenia CO₂ w spalinach nierozcieńczonych i rozcieńczonych oraz na podstawie stężenia HC, CO i CO₂ w spalinach rozcieńczonych (według równania (10)). Z kolei wartość stopnia rozcieńczenia obliczono na podstawie pomiarów ilości powietrza zasysanego przez silnik i paliwa spalane w silniku podczas testu NEDC. Na podstawie rys. 3 można zauważyć, iż za wyjątkiem fazy hamowania silnikiem, wartości DF i DR są do siebie bardzo zbliżone.



Rys. 3. Porównanie współczynnika i stopnia rozcieńczenia podczas testu NEDC dla samochodu P_1,6 [3]

Podstawiając do równania (8) równanie (9) i używając DF otrzymujemy:

$$m_{i,1,sp} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot \left[C_{e,i} - C_{d,i} \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \right] \quad (11)$$

Równanie (11) wykorzystywane jest do określenia masy związków szkodliwych emitowanych z pojazdów podczas testów na hamowni podwozowej.

Na podstawie przedstawionej powyżej analizy bilansu masy w układzie CVS można stwierdzić, że:

1. Masa związków szkodliwych $m_{i,1,sp}$ (obliczona na podstawie równania (11)) jest masą całkowitą i nie jest liczona jako różnica między wielkościami wyjściowymi i wejściowymi.
2. Objętość spalin nierozcieńczonych V_3 , która nie jest mierzona, jest szacowana na podstawie współczynnika rozcieńczenia DF, do obliczenia którego wykorzystywane jest stężenie CO₂ dla spalania stechiometrycznego. Uproszczenie to jest błędne dla silników pracujących ze współczynnikiem nadmiaru powietrza znacznie większym od 1 (np. w przypadku spalania ubogich mieszanek, odcinania paliwa, wyłączania cylindrów, wtrysku powietrza do komory spalania).
3. Równanie (11) do obliczenia masy *i*-tego składnika szkodliwego zostało wprowadzone w USA w roku 1971, dla limitu emisji węglowodorów HC = 0,41 g/milę [9].
4. Masa związków szkodliwych dostarczona z powietrzem do silnika wchodzi w skład całkowitej emisji związków szkodliwych.

Obliczanie masy związków szkodliwych z równania (11), wykorzystując do obliczeń stopień rozcieńczenia lub współczynnik rozcieńczenia, powoduje otrzymanie różnych wartości emisji. Podstawiając do równania (11) stopień rozcieńczenia otrzymano:

$$m_{i,1,spDR} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot \left[C_{e,i} - C_{d,i} \left(1 - \frac{1}{DR} \right) \right] \quad (12)$$

lub podstawiając współczynnik rozcieńczenia

$$m_{i,1,spDF} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot \left[C_{e,i} - C_{d,i} \left(1 - \frac{1}{DF} \right) \right] \quad (13)$$

Różnicę mas $\Delta m_{i,1,spDF-DR}$ zdefiniowano jako:

$$\Delta m_{i,1,spDF-DR} = m_{i,1,spDF} - m_{i,1,spDR} \quad (14)$$

lub wykorzystując równanie (11)

$$\Delta m_{i,1,spDF-DR} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{d,i} \left(\frac{1}{DF} - \frac{1}{DR} \right) \quad (15)$$

Z równania (12) wynika, że różnica mas $\Delta m_{i,1,spDF-DR}$ będzie wynosiła zero jeżeli stopień rozcieńczenia DR będzie równy współczynnikowi rozcieńczenia DF. We wszystkich innych przypadkach, gdy $DR \neq DF$ obliczona na tej podstawie masa związku szkodliwego będzie różna (w zależności od wykorzystania DR lub DF). Różnica mas z równania (12) jest proporcjonalna do objętości V_{mix} oraz stężenia związków szkodliwych w powietrzu dostarczonym do systemu CVS z otoczenia. Jeżeli są spełnione warunki:

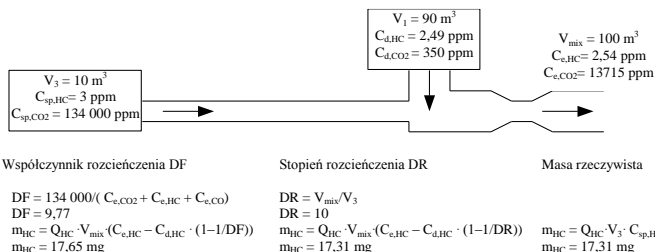
$$\left| \Delta m_{i,1,spDF-DR} \right| > m_{i,1,spDR} \quad \text{oraz} \quad \Delta m_{i,1,spDF-DR} < 0, \quad (16)$$

wtedy jest możliwe, że:

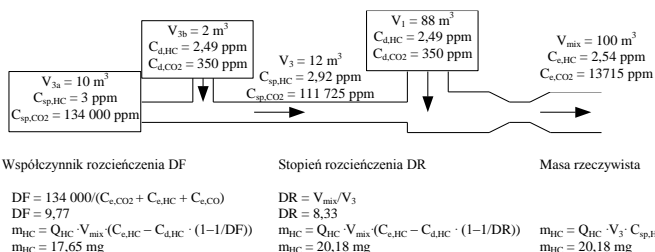
$$m_{i,1,spDF} = m_{i,1,spDR} + \Delta m_{i,1,spDF-DR}, \quad (17)$$

a to oznacza „ujemną masę całkowitą $m_{i,1,spDF}$ ”. Jest to przypadek występujący dla pojazdów SULEV podczas drugiej fazy testu FTP75, dla której masa związków szkodliwych emitowanych przez pojazd jest bliska zeru [12].

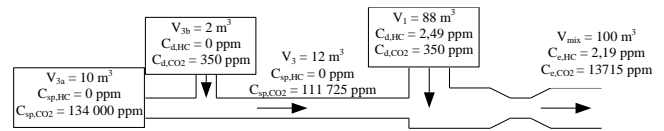
Na rysunkach 4-6 porównano wyniki masy węglowodorów dla obliczeń z wykorzystaniem współczynnika i stopnia rozcieńczenia spalin. Do obliczeń wykorzystano objętość powietrza dostarczoną do układu CVS, stężenia związków szkodliwych w powietrzu oraz objętość spalin nierozcieńczonych i stężenia związków szkodliwych emitowanych z silnika spalinowego. Wyniki porównano z rzeczywistą masą węglowodorów. Dla współczynnika nadmiaru powietrza równego jeden, wyniki mas węglowodorów są do siebie zbliżone, natomiast wraz ze wzrostem wartości λ wyniki znacznie od siebie odbiegają.



Rys. 4. Porównanie masy węglowodorów obliczonej z wykorzystaniem współczynnika i stopnia rozcieńczenia dla silnika zasilanego mieszanką stechiometryczną ($\lambda=1$) [12]



Rys. 5. Porównanie masy węglowodorów obliczonej z wykorzystaniem współczynnika i stopnia rozcieńczenia dla silnika zasilanego mieszanką ubogą $\lambda = 1,2$ [12]



Współczynnik rozcieńczenia DF	Stopień rozcieńczenia DR	Masa rzeczywista
DF = 134 000 / (Cd,CO2 + Ce,HC + Ce,CO)	DR = V _{mix} / V ₃	m _{HC} = Q _{HC} · V ₃ · C _{p,HC}
DF = 9,77	DR = 8,33	m _{HC} = 0,00 mg
m _{HC} = Q _{HC} · V _{mix} · (C _{d,HC} - C _{d,HC} · (1-1/DF))	m _{HC} = Q _{HC} · V _{mix} · (C _{d,HC} - C _{d,HC} · (1-1/DR))	m _{HC} = 0,00 mg
m _{HC} = -2,53 mg	m _{HC} = 0,00 mg	

Rys. 6. Porównanie masy węglowodorów obliczonej z wykorzystaniem współczynnika i stopnia rozcieńczenia dla silnika zasilanego mieszanką ubogą $\lambda=1,2$ z reaktorem katalitycznym o stu procentowej sprawności oczyszczania węglowodorów [12]

W istniejących systemach CVS może się zdarzyć, że obliczona masa związku szkodliwego będzie masą ujemną. Wpływ na to ma przede wszystkim różnica w wartościach stopnia i współczynnika rozcieńczenia. Aby wyeliminować różnicę mas związków szkodliwych obliczoną z wykorzystaniem DR lub DF, zgodnie z równaniem (9) należy do obliczeń wykorzystać pomiary objętości powietrza V_1 dostarczanego do układu CVS oraz objętość spalin V_3 , które do tychczas nie są mierzone.

2.2. pojazd z silnikiem spalinowym

Zgodnie z rysunkiem 2, całkowita masa i-tego związku szkodliwego doprowadzona do silnika jest równa:

$$m_{i,2,we} = V_2 \cdot Q_i \cdot C_{d,i} + m_{pal} \cdot C_{pal,i}, \quad (18)$$

gdzie:

V_2 - objętość powietrza doprowadzona do silnika,

m_{pal} - masa paliwa doprowadzona do silnika,

$C_{pal,i}$ - stężenie i-tego związku szkodliwego zawartego w paliwie.

Masa i-tego składnika szkodliwego zawartego w spalinach $m_{i,3,wy}$ jest równa:

$$m_{i,3,wy} = V_3 \cdot Q_i \cdot C_{sp,i} \quad (19)$$

Całkowitą masę nierozcieńczonych spalin m_{sp} zdefiniowano jako:

$$m_{sp} = V_3 \cdot Q_{sp} = V_2 \cdot Q_{pow} + m_{pal}, \quad (20)$$

gdzie:

Q_{sp} - gęstość spalin nierozcieńczonych,

Q_{pow} - gęstość powietrza,

oraz wprowadzając

$$V_2 \cdot Q_{pow} = m_{pal} \cdot \lambda \cdot L_{min}, \quad (21)$$

gdzie:

λ - współczynnik nadmiaru powietrza,

L_{min} - masa powietrza potrzebna do spalenia 1 kg paliwa,

a także przyjmując założenie, że:

$$Q_{sp} \approx Q_{pow}, \quad (22)$$

otrzymano wzór na masę i-tego składnika szkodliwego zawartego w spalinach silnikowych:

$$m_{sp,i} = V_2 \cdot Q_i \cdot C_{sp,i} \left(1 + \frac{1}{\lambda \cdot L_{min}} \right) \quad (23)$$

Różnica mas i-tego składnika szkodliwego emitowanego i dostarczonego do silnika jest równa:

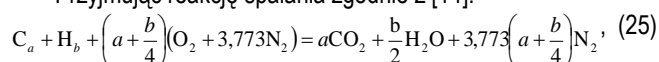
$$\Delta m_{sp,i} = V_2 \cdot Q_i \cdot \left[C_{sp,i} \left(1 + \frac{1}{\lambda \cdot L_{min}} \right) - C_{d,i} \right] \quad (24)$$

Na podstawie równania (24) można wyróżnić 3 przypadki zmiany emisji i-tego składnika szkodliwego:

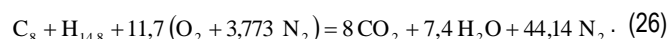
1. $\Delta m_{sp,i} = 0$ - brak emisji.
2. $\Delta m_{sp,i} > 0$ - zwiększenie emisji.
3. $\Delta m_{sp,i} < 0$ - zmniejszenie emisji.

Wielkość $\Delta m_{sp,i}$ prezentuje zmiany emisji i-tego składnika szkodliwego powstającego podczas spalania w silniku. Dla przypadku 3, gdy $\Delta m_{sp,i} < 0$, spaliny zawierają mniejsze stężenie i-tego składnika szkodliwego niż powietrze (np. w wyniku skutecznie działających urządzeń oczyszczających spaliny) [13].

Przyjmując reakcję spalania zgodnie z [14]:



gdzie 3,773 oznacza stosunek molowy azotu do tlenu (zawartych w powietrzu), równanie spalania (dla teoretycznego paliwa $C_8H_{14,8}$, dla którego stosunek molowy H/C wynosi 1,85), opisuje reakcja:



Dla współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1$ (stechiometrycznego spalania), błąd obliczenia objętości spalin jest równy zeru (tabela 1). Dla $\lambda > 1$ wartość błędu jest większa, ponad 4% dla współczynnika nadmiaru powietrza równego 3.

Tab. 1. Porównanie objętości spalin dla różnych wartości współczynnika nadmiaru powietrza [13]

Spaliny	Jednostka	λ [-]				
		1	1,2	1,5	2	3
CO ₂	[mol]	8	8	8	8	8
H ₂ O	[mol]	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
N ₂	[mol]	44,1	52,9	66,2	88,2	132,3
O ₂	[mol]	0	2,3	5,85	11,7	23,4
Σ	[mol]	59,5	70,7	87,4	115	171
$\lambda \Sigma_{(\lambda=1)}$	[mol]	59,5	71,4	89,3	119	179
Różnica	[%]	0	1,0	2,1	3,1	4,2

2.3. laboratorium badania emisji wraz z pojazdem i systemem CVS

Masa całkowita i-tego składnika szkodliwego doprowadzona do laboratorium badania emisji jest równa:

$$m_{i,3,we} = V_1 \cdot Q_i \cdot C_{d,i} + V_2 \cdot Q_i \cdot C_{d,i} \quad (27)$$

Powietrze doprowadzone również w inny sposób do silnika (lub układu wylotowego, np. dodatkowy wtrysk powietrza do cylindra lub przed reaktor katalityczny) jest uwzględniane przez V_2 . Wynika z tego, że stężenie i-tego składnika szkodliwego w dodatkowym powietrzu musi być takie samo jak w powietrzu wykorzystywanym do spalania.

Całkowita objętość powietrza doprowadzona do silnika i systemu CVS jest równa:

$$V_{tot} = V_1 + V_2 \quad (28)$$

Wykorzystując równanie (21) otrzymano:

$$V_{mix} = V_{tot} \left[1 + \frac{1}{\lambda_{tot} \cdot L_{min}} \right] \quad (29)$$

gdzie: $\lambda_{tot} = 13,4 / C_{e,CO_2}$ - współczynnik nadmiaru powietrza w spalinach rozcieńczonych
a równanie (27) przyjmuje postać:

$$m_{i,3,we} = \frac{V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{d,i}}{1 + \frac{1}{\lambda_{tot} \cdot L_{min}}} \quad (30)$$

Masa i-tego składnika szkodliwego z układu CVS jest równa:

$$m_{i,3,wy} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{e,i} \quad (31)$$

a różnica mas doprowadzonych i wyprowadzonych:

$$\Delta m_{i,3,wy-we} = \frac{V_{mix} \cdot Q_i (C_{e,i} - C_{d,i})}{1 + \frac{1}{\lambda_{tot} \cdot L_{min}}} \quad (32)$$

Na podstawie równania (32) oblicza się masę składników szkodliwych emitowanych z silnika podczas pomiarów z wykorzystaniem systemu CVS. Zanieczyszczenie powietrza nie wchodzi w skład emisji silnikowej.

Dla stężenia w spalinach rozcieńczonych $CO_2 = 1,35\%$ oraz $L_{min} = 14,5$ równanie (32) przyjmuje postać:

$$\Delta m_{i,3,wy-we} = \frac{V_{mix} \cdot Q_i (C_{e,i} - C_{d,i})}{1 + \frac{1}{164}} \quad (33)$$

co można uprościć do postaci

$$\Delta m_{i,3,wy-we} = V_{mix} \cdot Q_i (C_{e,i} - C_{d,i}) \quad (34)$$

Aby zminimalizować błędy pomiarowe należałoby zastosować w systemie CVS, jako powietrze rozcieńczające gaz, który nie zawierałby badanych składników szkodliwych, np. syntetyczne powietrze, wtedy stężenie $c_i = 0$. Masa składników szkodliwych dostarczanych do systemu CVS wynosiłaby:

$$m_{i,1,we} = V_2 \cdot Q_i \cdot 0 + V_3 \cdot Q_i \cdot C_{d,i} \quad (35)$$

oraz opuszczających system CVS:

$$m_{i,1,wy} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{e,i} \quad (36)$$

Podstawiając powyższe równanie do (3) otrzymuje się:

$$m_{i,1,sp} = V_{mix} \cdot Q_i \cdot C_{e,i} \quad (37)$$

Z równania (37) wynika, że całkowita masa i-tego składnika szkodliwego nie byłaby mierzona jako różnica pomiędzy składnikami wyjściowymi i wejściowymi do systemu CVS.

W celu uzyskania bardzo dokładnych wyników emisji spalin dla pojazdów o niskiej emisji należałoby wprowadzić:

- pomiar bieżącego natężenia przepływu spalin z układu wylotowego pojazdu,
- stały stopień rozcieńczenia spalin DR,

- napełnianie worków pomiarowych próbką rozcieńczonych spalin proporcjonalne do natężenia przepływu spalin z układu wydechowego pojazdu.

PODSUMOWANIE

Układ poboru i rozcieńczania spalin CVS jest jednym z najważniejszych urządzeń stosowanych przy pomiarach emisji związków szkodliwych spalin w testach na hamowni podwoziowej. To od niego zależy niepewność zebranej do worków pomiarowych próbki spalin rozcieńczonych. Ponadto, różnica stężeń między zawartością danego składnika w worku spalin rozcieńczonych, a jego zawartością w worku z powietrzem otoczenia ma istotny wpływ na dokładność pomiarów emisji. Z tego powodu stosuje się możliwie niskie współczynniki rozcieńczania spalin, co pociąga za sobą konieczność izolowania i ogrzewania niektórych elementów układu próbkowania.

Na podstawie przedstawionych w artykule analiz bilansu masy w układzie CVS można m.in. stwierdzić, że:

- objętość spalin nierozcieńczonych V_3 jest szacowana na podstawie współczynnika rozcieńczania DF, do obliczania którego wykorzystywane jest stężenie CO_2 dla spalania stechiometrycznego. Uproszczenie to jest błędne dla silników pracujących ze współczynnikiem nadmiaru powietrza znacznie większym od 1,
- może się zdarzyć, że obliczona masa związku szkodliwego będzie masą ujemną. Wpływ na to ma przede wszystkim różnica w wartościach stopnia i współczynnika rozcieńczania,
- aby wyeliminować różnicę mas związków szkodliwych obliczoną z wykorzystaniem DR lub DF, należałoby wprowadzić pomiary objętości powietrza V_1 dostarczanego do układu CVS oraz objętości spalin V_3 , które dotychczas nie są mierzone [9],
- w celu zwiększenia dokładności pomiarów należałoby wprowadzić stały stopień rozcieńczenia spalin DR oraz proporcjonalne do natężenia przepływu spalin z układu wydechowego napełnianie worków pomiarowych próbką rozcieńczonych spalin.

Niniejszy artykuł związany jest z tematem „Analiza możliwości zwiększenia dokładności metody pomiarów emisji spalin, zużycia paliwa i parametrów dynamicznych samochodów podczas badań na hamowni podwoziowej oraz rozszerzenie metodyki badań emisji gazowych związków szkodliwych i cząstek stałych o badania nieznormalizowane podczas testów emisji na hamowni podwoziowej” w ramach prac naukowo-badawczych, realizowanych w BOSMAL w latach 2015-2016 .

BIBLIOGRAFIA

1. Bielaczyc P., Szczotka A., Pajdowski P., Woodburn J., *Development of vehicle exhaust emission testing methods – BOSMAL's new emission testing laboratory*. PTNSS-2011-SS1-101. Combustion Engines 1/2011 (144).
2. Bielaczyc P., Szczotka A., Pajdowski P., Woodburn J., *Development of automotive emissions testing equipment and test methods in response to legislative, technical and commercial*

requirements. Paper 2013-103. Combustion Engines 1/2013 (152).

3. Materiały własne IBIRM Bosmal
4. UNECE, Regulation No. 83, 2015, available online: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R083r5e.pdf>, accessed 60 Feb 2015.
5. Sherman M., Lennon K., Chase R., *Error Analysis of Various Sampling Systems*. SAE Paper 2001-01-0209, 2001.
6. Silvis W., Chase R., *Proportional Ambient Sampling: A CVS Improvement for ULEV and Lean Engine Operation*. SAE Paper 1999-01-0154, 1999.
7. Silvis W., Harvey R., Dageforde A., *A CFV Type Mini-dilution Sampling System for Vehicle Exhaust Emissions Measurement*. SAE Paper 1999-01-0151, 1999.
8. Materiały firmy AVL.
9. Seifert G.: *What is Zero Emission and how can it be Measured?* MTZ worldwide 1/2002 Volume 63.
10. Code of Federal Regulations; Protection of Environment 40; Part 425-699; §86.109-94; §86.082-2; §86.144-94; §86.1803-01; §86.144-78, Revised as of 1.07.1999.
11. Directive 98/69/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 1998, Official Journal No. L350/1, 28.12.1998.
12. Behrendt H., Mörsch O., Seifert C.T.: *Studies on Enhanced CVS Technology to Achieve SULEV Certification*. SAE Paper 2002-01-0048.
13. Correcting Negative Calculated Emission Levels to Zero. United States Environmental Protection Agency, 8.02.2001.
14. Heywood J.B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Mc Graw-Hill, New York 1988.

Error sources during exhaust emission measurements on chassis dynamometer – mass balance analysis

Exhaust emission measurements on the chassis dynamometer are one of the most important and most complex tests which are performed on vehicles driven by combustion engines. This paper describes in detail one of the most important components of the exhaust emission laboratory, i.e. the CVS (Constant Volume Sample) sampling system. Moreover, balance of the mass of the individual components of the CVS system which could have a substantial impact on the accuracy of the emission measurements are analysed.

Autorzy:

dr inż. **Piotr Bielaczyc** – kierownik Zakładu Badań Silników w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej

dr inż. **Andrzej Szczotka** – kierownik Pracowni Badań Toksyczności Spalin w Zakładzie Badań Silników w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej

inż. **Joseph Woodburn** – samodzielny pracownik ds. badań w Pracowni Badań Toksyczności Spalin w Zakładzie Badań Silników w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej