

Jerzy MERKISZ<sup>1</sup>  
Arkadiusz BARCZAK<sup>1</sup>  
Jacek PIELECHA<sup>1</sup>

### BADANIE ZMIENNOŚCI EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ Z ZASTOSOWANIEM METODY PCA

*Obecne homologacyjne procedury pomiaru emisji spalin nie odzwierciedlają całkowicie emisji mierzonej podczas badań drogowych. Rozwiązaniem tego problemu mogą okazać się testy, wykonywane wyłącznie w rzeczywistych warunkach ruchu, z wykorzystaniem mobilnych analizatorów spalin PEMS (Portable Emissions Measurement Systems). Jednakże pomiary emisji w takich warunkach cechuje duża zmienność. W związku z tym do oceny zmienności stężenia CO, CO<sub>2</sub>, HC i NO<sub>x</sub> zastosowano metodę PCA (Principal Component Analysis). Analizę taką przeprowadzono dla 4-wymiarowej przestrzeni wykorzystując: prędkość i przyspieszenie pojazdu oraz prędkość obrotową i moment obrotowy silnika.*

### ANALYZING POLLUTANT EMISSIONS VARIABILITY USING PCA METHOD

*Current laboratory emissions testing fails to capture the wild range of potential on-road emissions. A promising remedy for this problem may be attained by supplementing laboratory emissions testing with complementary test procedures such as PEMS on-road emissions testing. Yet, traffic emissions are highly variable. In this article, the PCA method was used to assess the variability of CO, CO<sub>2</sub>, HC and NO<sub>x</sub> emissions measured during the on-road PEMS test. The analysis was conducted in up to 4-dimensional model space: speed, acceleration, engine revolution and engine torque.*

#### 1. WPROWADZENIE

Szkodliwość silników spalinowych dla środowiska naturalnego ocenia się przede wszystkim na podstawie oceny wielkości, charakteryzujących emisję zanieczyszczeń, w stosunku do limitów tych wielkości stanowiących przez akty normatywne. Wielkościami zanieczyszczeń z silników spalinowych, stosowanymi do oceny ich jakości ekologicznej są:

- emisja drogowa zanieczyszczeń (masa zanieczyszczeń względem drogi przebywanej przez pojazd); wykorzystuje się ją do oceny silników spalinowych stosowanych tylko do pojazdów, a przede wszystkim do silników samochodów osobowych i lekkich pojazdów ciężarowych;

<sup>1</sup>Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, Poznań, Tel.: 61-665-2207

– emisja jednostkowa zanieczyszczeń (masa względem pracy użytecznej silnika spalinowego); wykorzystuje się ją do oceny silników spalinowych o różnym zastosowaniu, m.in. ciężkich silników spalinowych do samochodów ciężarowych i autobusów oraz maszyn pozadrogowych.

Emisję drogową wyznacza się w badaniach homologacyjnych jako wartość średnią w testach jezdnych, realizowanych na hamowni podwoziowej. W Unii Europejskiej obecne limity są oznaczane jako Euro 4 – Euro 5 i dotyczą:

- tlenku węgla (CO),
- węglowodorów (HC),
- tlenków azotu (NO<sub>x</sub>),
- cząstek stałych (PM),

Test homologacyjny NEDC (*New European Driving Cycle* – nowy europejski test jezdny), składa się z testu UDC (*Urban Driving Cycle*), symulującego jazdę miejską oraz EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*) do symulacji ruchu poza miastami.

Emisję jednostkową w badaniach homologacyjnych wyznacza się jako wartość średnią w testach realizowanych na hamowni silnikowej. Obecne limity emisji jednostkowej zanieczyszczeń są oznaczane jako Euro IV – Euro V i przeprowadza się je w testach:

- statycznym ESC (European Stationary Cycle),
- dynamicznym ETC (European Transient Cycle).

Spełnienie przez silnik spalinowych wszystkich wymagań limitów wielkości charakteryzujących emisję zanieczyszczeń umożliwia zakwalifikowanie silnika do właściwej kategorii ekologicznej.

Wymienione badania stanowiskowe realizowane są w laboratoriach, w których elementy pojazdu, jego zespoły, a także kompletne pojazdy są badane w warunkach symulujących występujące w rzeczywistej eksploatacji. Stwarza to lepsze możliwości badawcze, a równocześnie możliwość oceny badanego obiektu w stosunkowo krótkim czasie. Do najważniejszych walorów badań stanowiskowych należą następujące ich właściwości:

- stwarzają dużo większe możliwości pomiarowe niż badania drogowe,
- zapewniają stałość parametrów badań i ich powtarzalność,
- umożliwiają testowanie wpływu prawie wszystkich parametrów środowiska,
- umożliwiają badania porównawcze różnych obiektów w tych samych warunkach,
- umożliwiają szybszą analizę wyników pomiarów i wyciąganie stosownych wniosków.

Badania emisyjności pojazdów z warunkach drogowych są zgodne z ustaleniami zawartymi w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (715/2007), która w celu większego odzwierciedlenia testów pomiarowych rozważa wprowadzenie mobilnych systemów pomiarowych do oceny ekologiczności pojazdów w rzeczywistych warunkach ruchu. Badania te cechuje: możliwość bogatego oprzyrządowania pojazdu w analizatory spalin (do pomiaru związków gazowych i cząstek stałych), w tym układy do telemetrycznego przekazywania sygnałów pomiarowych, znaczne zintensyfikowanie badań, a także co jest wadą badań drogowych niepowtarzalność pomiarów. Badania eksploatacyjne prowadzone są w warunkach najbardziej zbliżonych do rzeczywistości, na ogólnie dostępnych drogach, w warunkach normalnego ruchu drogowego. Powoduje to, że są długotrwałe, wymagają dobrej organizacji, mogą być zakłócanie zawsze możliwymi

sytuacjami drogowymi i koniecznością wymiany uszkodzonych części lub nawet zespołów. Z związku z możliwą superpozycją nieprzewidywalnych sytuacji drogowych są badaniami niepowtarzalnymi, a ich wyniki cechuje duża zmienność [3].

## 2. Badanie zmienności emisji zanieczyszczeń zmierzonych za pomocą PEMS

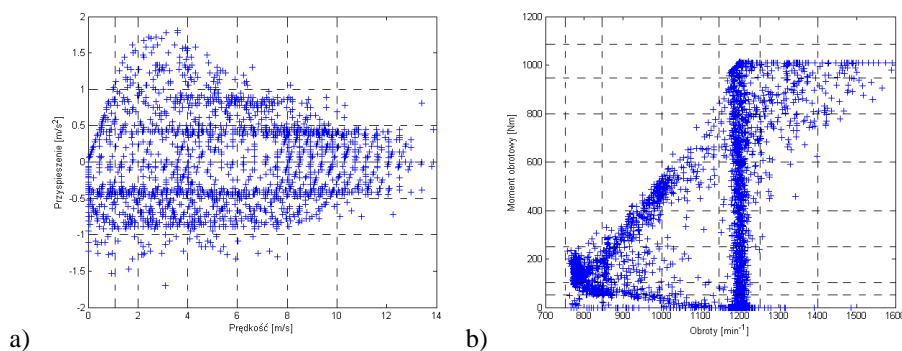
### 2.1 Metodyka badań

Pomiarów emisyjności pojazdu (autobusu) dokonano w warunkach ruchu miejskiego w Poznaniu. Warunki tak dobrano, aby istniała możliwość jak największego odwzorowania rzeczywistych warunków ruchu: obciążenie linii autobusowej było zgodne ze średnim obciążeniem linii poznańskich. Obiektem badań był 18-metrowy autobus wyposażony w silnik hybrydowy, który spełniał normę EEV (*Enhanced Environmental friendly Vehicles* – pojazdy przyjazne środowisku). Wyposażony był w układ selektywnej redukcji katalitycznej oraz filtr cząstek stałych.

Do pomiarów stężenia związków toksycznych wykorzystano mobilny analizator do badań toksyczności SEMTECH DS firmy Sensors Inc. Umożliwiał on pomiar stężenia związków szkodliwych (CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>), mierząc jednocześnie masowe natężenie spalin. Do jednostki centralnej analizatora istnieje możliwość przesyłu danych bezpośrednio z systemu diagnostycznego pojazdu CAN oraz sygnału lokalizacji GPS [2, 5].

### 2.2 Formalizacja stanów wejścia

Położenie punktów pomiarowych w układzie prędkość-przyspieszenie przedstawiono na rysunku 1a, natomiast w układzie prędkość obrotowa-moment obrotowy na rysunku 1b.



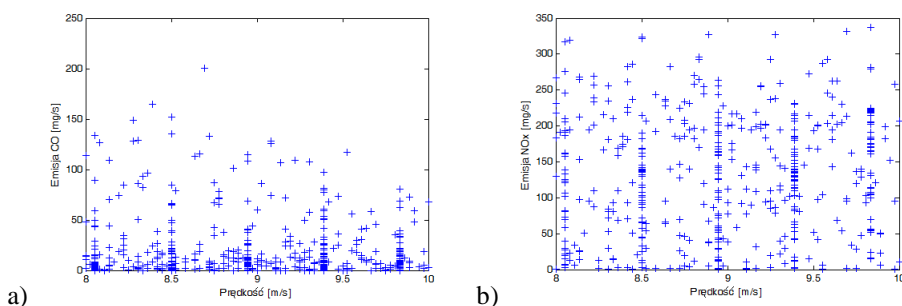
Rys. 1. Punkty pomiarowe w układzie a) prędkość–przyspieszenie b) prędkość obrotowa–moment obrotowy

Przeprowadzono wstępne analizy stanów pracy, na podstawie których ustalono przedziały zmienności dla prędkości, przyspieszenia, prędkości obrotowej oraz momentu obrotowego silnika (zaznaczone na rys. 1a oraz rys. 1b):

- dla prędkości: (0; 0], (0; 1], (1; 2], (2; 4], (4; 6], (6; 8], (8; 10], (10; 14],

- dla przyspieszenia: [-2,0;-1,0), [-1,0; -0,5), [-0,5; 0), (0;0], (0; 0,5], (0,5; 1,0], (1,0; 2,0],
- dla prędkości obrotowej: (750; 850], (850; 1000], (1000; 1150], (1150; 1250], (1250; 1400], (1400; 1600],
- dla momentu obrotowego: (0; 0], (0; 50], (50; 100], (100; 250], (250; 400], (400; 600], (600; 800], (800; 950], (950; 1100].

Uzyskane w wyniku pomiarów wielkości emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> charakteryzuje duża zmienność wartości we wszystkich zdefiniowanych przedziałach prędkości, przyspieszenia, prędkości obrotowej i momentu obrotowego (dla wielu punktów pomiarowych zmierzono wiele różnych wartości emisji poszczególnych zanieczyszczeń). Jako przykład przedstawiono wartości emisji CO (rysunek 2a) oraz NO<sub>x</sub> (rysunek 2b) dla prędkości w przedziale od 8 [m/s] do 10 [m/s].



Rys. 2. Wartości emisji dla przedziału prędkości od 8 [m/s] do 10 [m/s] dla a) CO, b) NO<sub>x</sub>.

W celu przeprowadzenia ilościowej oceny zmienności wartości emisji zanieczyszczeń, wyznaczono wartości maksimum, średniej, mediany oraz minimum dla przedziałów prędkości. Wybrane wyniki zebrano w tablicy 1.

Badanie zmienności emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub>, przeprowadzono dla przyjętych stanów pracy:

- stan A: reprezentowany prędkością (8 kostek 1-wymiarowych  $v_i$ ),
- stan B: reprezentowany prędkością i przyspieszeniem (56 kostek 2-wymiarowych  $v_i-a_j$ ),
- stan C: reprezentowany prędkością, przyspieszeniem i prędkością obrotową (336 kostek 3-wymiarowych  $v_i-a_j-n_k$ ),
- stan D: reprezentowany prędkością, przyspieszeniem, prędkością obrotową oraz momentem obrotowym (3024 kostki 4-wymiarowe  $v_i-a_j-n_k-M_l$ )

gdzie:  $i = 1, \dots, 8$

$j = 1, \dots, 7$

$k = 1, \dots, 6$

$l = 1, \dots, 9$

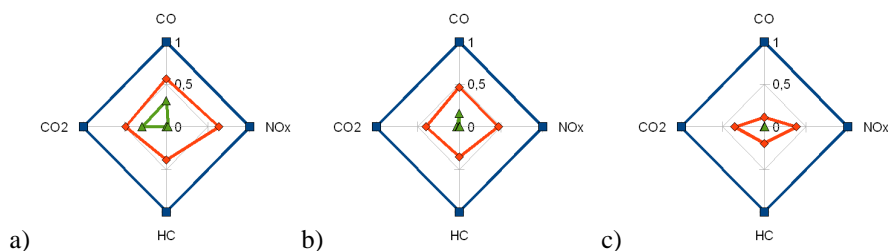
Występują kostki  $n$ -wymiarowe, gdzie  $n = 2, 3, 4$ , znajdujące się poza warunkami pracy układu (brak wartości pomiarowych).

Tab. 1. Zestawienie wartości maksimum, średniej, mediany oraz minimum emisji CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla wybranych przedziałów prędkości

	Rodzaj emisji	Maksimum [mg/s]	Średnia [mg/s]	Mediana [mg/s]	Minimum [mg/s]
Prędkości z zakresu (0, 0]	CO	8,62	4,89	4,83	2,65
	CO <sub>2</sub>	3605	1772	1688	1061
	HC	0,150	0,058	0,060	0,001
	NO <sub>x</sub>	85,28	53,81	54,42	1,91
Prędkości z zakresu (0, 1]	CO	13,67	6,40	5,97	2,16
	CO <sub>2</sub>	5982	2393	2110	175
	HC	0,170	0,060	0,060	0,001
	NO <sub>x</sub>	103,32	48,21	54,86	0,40
Prędkości z zakresu (8, 10]	CO	200,21	22,61	9,96	2,11
	CO <sub>2</sub>	23237	8218	7146	1
	HC	0,560	0,108	0,100	0,001
	NO <sub>x</sub>	337,50	129,94	130,42	0,63

## 2.2 Badanie zmienności emisji zanieczyszczeń z zastosowanie wykresów radarowych

Analiza zmienności dotyczy 4-wymiarowego wektora reprezentowanego wielkościami emisji CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub>. Przeprowadzono analizę jakościową z zastosowaniem wykresów radarowych, które w graficzny sposób umożliwiają interpretację zmienności wielowymiarowych danych. Umożliwiają one analizę, które zmienne są dominujące dla danego zestawu zmiennych, a wartości których mają podobne zakresy zmienności.

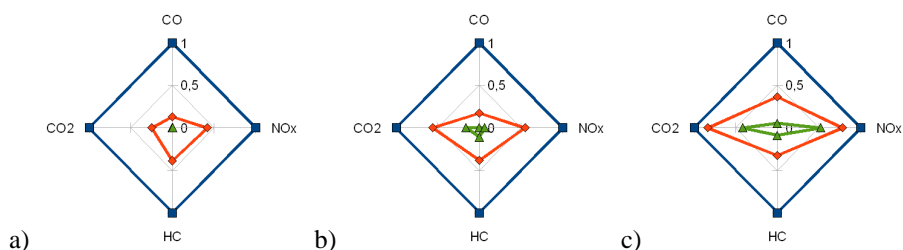


Rys. 3. Wykresy dla względnych wartości maksimum (kwadrat), średniej (romb) oraz minimum (trójkąt) emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla 1-wymiarowych kostek a)  $v_1 = 0$  b)  $v_2 \in (0; 1]$  c)  $v_7 \in (8; 10]$

Wykresy radarowe przedstawiono dla wybranych  $n$ -wymiarowych kostek odpowiadających przyjętym stanom pracy, poczynając od kostek 1-wymiarowych dla przedziałów prędkości (stan A), następnie dodając do istniejących podziałów kolejne wymiary: przyspieszenia (kostki 2-wymiarowe – stan B), prędkości obrotowej silnika (kostki 3-wymiarowe – stan C) oraz momentu obrotowego silnika (kostki 4-wymiarowe – stan D). Każde z ramion wykresu przedstawia inną zmienną emisji zanieczyszczeń CO,

CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub>. Wartości maksimum (linia ciągła, gdzie punkty oznaczone są kwadratem), średniej (linia ciągła, gdzie punkty oznaczone są rombem) oraz minimum (linia ciągła, gdzie punkty oznaczone są trójkątem) są wartościami względnymi, względem maksymalnych wartości danej zmiennej w badanej kostce. Wykresy zmienności emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla przykładowych kostek 1-wymiarowych przedstawiono na rys. 3a dla  $v_1 = 0$ , na rys. 3b dla  $v_2 \in (0; 1]$ , na rys. 3c dla  $v_7 \in (8; 10]$ .

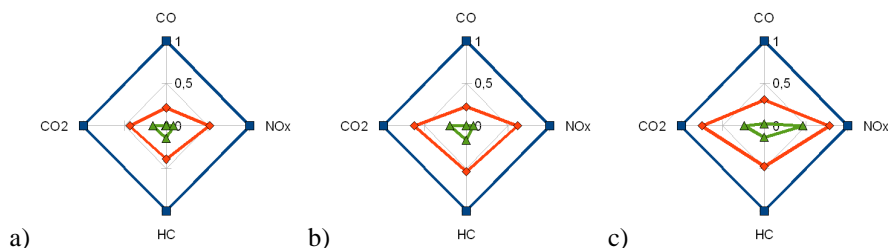
Stwierdzono bardzo dużą zmienność wartości badanych emisji w każdej 1-wymiarowej kostce (niemal wszystkie wykresy są identyczne z wykresem z rys. 3c). Do kolejnego kroku badania wybrano 1-wymiarową kostkę dla przedziału prędkości  $v_7 \in (8; 10]$ . Dodano 2-gi wymiar w postaci przyspieszenia, tworząc kostki 2-wymiarowe. Wykresy zmienności emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla przykładowych kostek 2-wymiarowych, dla których  $v_7 \in (8; 10]$ , przedstawiono na rys. 4a dla  $a_3 \in [-0,5; 0)$ , na rys. 4b dla  $a_5 \in (0; 0,5]$ , na rys. 4c dla  $a_6 \in (0,5; 1]$ .



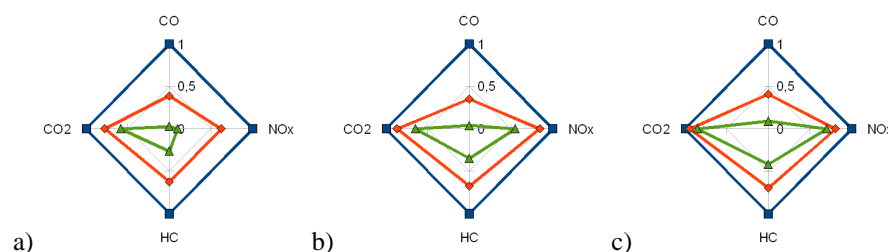
Rys. 4. Wykresy dla względnych wartości maksimum (kwadrat), średniej (romb) oraz minimum (trójkąt) emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla 2-wymiarowych kostek, gdzie  $v_7 \in (8; 10]$  oraz a)  $a_3 \in [-0,5; 0)$ , b)  $a_5 \in (0; 0,5]$ , c)  $a_6 \in (0,5; 1]$

Stwierdzono, że niektóre badane emisje dla niewielkiej liczby kostek 2-wymiarowych, charakteryzuje mniejsza zmienność – przykładowo, dotyczy to emisji CO oraz NO<sub>x</sub> dla 2-wymiarowej kostki  $v_7 a_6$  (rys. 4c). Do kolejnego kroku badania wybrano 2-wymiarową kostkę dla przedziału prędkości  $v_7 \in (8; 10]$  oraz przedziału przyspieszenia  $a_5 \in (0; 0,5]$ . Dodano 3-ci wymiar w postaci prędkości obrotowej silnika, tworząc kostki 3-wymiarowe. Wykresy zmienności emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla przykładowych kostek 3-wymiarowych, dla których  $v_7 \in (8; 10]$ ,  $a_5 \in (0; 0,5]$ , przedstawiono na rys. 5a dla  $n_3 \in (1000; 1150]$ , na rys. 5b dla  $n_4 \in (1150; 1250]$ , na rys. 5c dla  $n_5 \in (1250; 1400]$ .

Dla większości 3-wymiarowych kostek, dla większości badanych emisji zanieczyszczeń stwierdzono nieznaczne zanikanie zmienności. Do kolejnego kroku badania wybrano 3-wymiarową kostkę dla przedziału prędkości  $v_7 \in (8; 10]$ , przedziału przyspieszenia  $a_5 \in (0; 0,5]$  oraz przedziału obrotów silnika  $n_4 \in (1150; 1250]$ . Dodano 4-ty wymiar w postaci momentu obrotowego silnika, tworząc kostki 4-wymiarowe. Wykresy zmienności emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla przykładowych kostek 4-wymiarowych, dla których  $v_7 \in (8; 10]$ ,  $a_5 \in (0; 0,5]$ ,  $n_4 \in (1150; 1250]$ , przedstawiono na rys. 6a dla  $M_3 \in (600; 800]$ , na rys. 6b dla  $M_4 \in (800; 950]$ , na rys. 6c dla  $M_5 \in (950; 1100]$ .



Rys. 5. Wykresy dla względnych wartości maksimum (kwadrat), średniej (romb) oraz minimum (trójkąt) emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla 3-wymiarowych kostek, gdzie  $v_7 \in (8; 10]$ ,  $a_5 \in (0; 0,5]$  oraz a)  $n_3 \in (1000; 1150]$  b)  $n_4 \in (1150; 1250]$  c)  $n_5 \in (1250; 1400]$



Rys. 6. Wykresy dla względnych wartości maksimum (kwadrat), średniej (romb) oraz minimum (trójkąt) emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla 4-wymiarowych kostek, gdzie  $v_7 \in (8; 10]$ ,  $a_5 \in (0; 0,5]$ ,  $n_4 \in (1150; 1250]$  oraz a)  $M_3 \in (600; 800]$  b)  $M_4 \in (800; 950]$  c)  $M_5 \in (950; 1100]$

Stwierdzono, że dla wielu 4-wymiarowych kostek, dla emisji zanieczyszczeń CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz HC, uzyskana zmienność wydaje się być istotnie mniejsza. Jest to stwierdzenie świadczące o tym, że przyjęta koncepcja badania zmienności emisji zanieczyszczeń dla wielowymiarowych stanów pracy sprawdziła się. Zastosowanie wykresów radarowych umożliwiło ocenę jakościową zmienności niezbędną na etapie wstępnej analizy wyników eksperymentu. Zasadniczym ograniczeniem wykorzystania wykresów radarowych w analizie zmienności jest wymiar zadania wymuszający prowadzenie czasochłonnych i pracochłonnych badań (badanie tylko wybranych kostek  $n$ -wymiarowych).

### 2.3 Badanie zmienności za pomocą metody PCA

Badanie ilościowej oceny zmienności emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub>, dla przyjętych stanów pracy przeprowadzono z zastosowaniem PCA (*Principal Component Analysis*).

PCA jest statystyczną metodą wielowymiarową [1, 4], umożliwiającą transformację wektorów bazowych z wykorzystaniem macierzy kowariancji między zmiennymi reprezentującymi badany proces. Przyjmując, że  $n$  skorelowanych zmiennych, opisanych wektorem  $\mathbf{x}$  w postaci:

$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n] \quad (1)$$

poddano  $m$  obserwacjom, wyniki eksperymentu przedstawiono w postaci macierzy danych:

$$\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^{m \times n} \quad (2)$$

gdzie  $m > n$ . Losowe związki między zmiennymi opisano za pomocą macierzy kowariancji:

$$\text{Cov}(\mathbf{X}) = \frac{1}{m-1} \mathbf{X}^T \mathbf{X} \quad (3)$$

Transformacja do nowych wektorów bazowych realizowana jest przez rozwiązanie zagadnienia własnego dla macierzy kowariancji.

$$\text{Cov}(\mathbf{X}) \mathbf{p}_i = \lambda_i \mathbf{p}_i \quad (4)$$

gdzie:  $\mathbf{p}_i$  –  $i$ -ty wektor własny

$\lambda_i$  –  $i$ -ta wartość własna

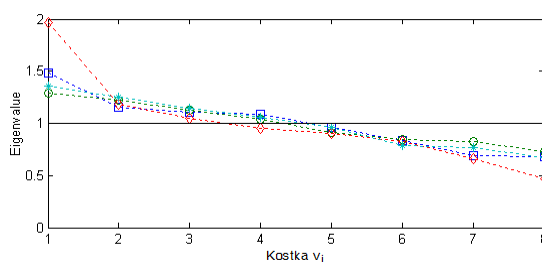
Wartości własne  $\lambda_i$ , określające stopień rozproszenia wyników pomiarów reprezentowanych wartościami wariancji, szeregowane są malejąco. Wartość własna  $\lambda_i = 1$  stanowi granicę świadczącą o tym, że zmienne, którym odpowiadają wartości własne większe niż 1 charakteryzują się istotną zmiennością, natomiast zmienne, którym odpowiadają wartości własne znacznie mniejsze od wartości 1 charakteryzują się małą zmiennością.

Wektor  $\mathbf{x}_v^r$  reprezentuje stan pracy A:

$$\mathbf{x}_v^r = [v_1 \dots v_8] \quad (5)$$

gdzie:  $r$  – rodzaje emisji zanieczyszczeń: CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub>

Wartości własne macierzy kowariancji  $\mathbf{X}_v^r$  [6] przedstawiono na rys. 7.



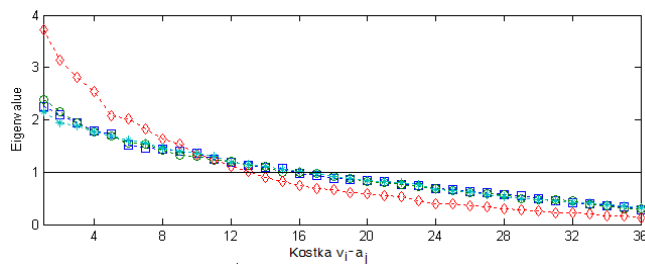
Rys. 7. Wartości własne odpowiadające zmienności emisji zanieczyszczeń CO (kwadrat), CO<sub>2</sub> (kółko), HC (romb) oraz NO<sub>x</sub> (gwiazdka) w 1-wymiarowych kostkach.

Wektor  $\mathbf{x}_{va}^r$  reprezentuje stan pracy B:

$$\mathbf{x}_{va}^r = [va_1 \dots va_{36}] \quad (6)$$



Wartości własne macierzy kowariancji  $\mathbf{X}_{va}^r$  przedstawiono na rys. 8.

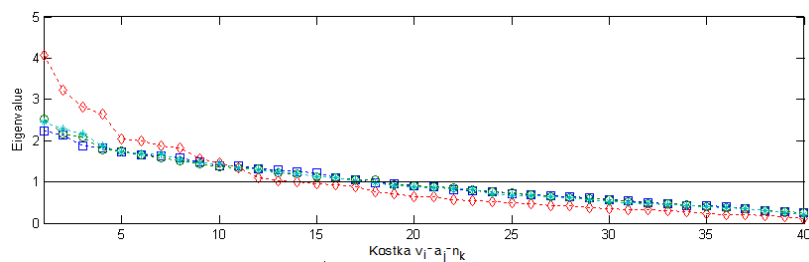


Rys. 8. Wartości własne odpowiadające zmienności emisji zanieczyszczeń CO (kwadrat),  $CO_2$  (kółko), HC (romb) oraz  $NO_x$  (gwiazdka) w 2-wymiarowych kostkach.

Wektor  $\mathbf{x}_{van}^r$  reprezentuje stan pracy C:

$$\mathbf{x}_{van}^r = [van_1 \dots van_{40}] \quad (7)$$

Wartości własne macierzy kowariancji  $\mathbf{X}_{van}^r$  przedstawiono na rys. 9.

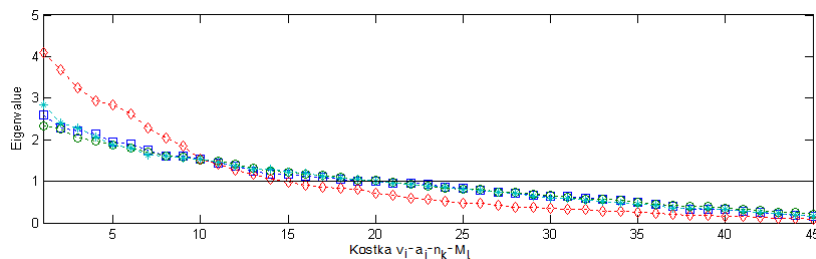


Rys. 9. Wartości własne odpowiadające zmienności emisji zanieczyszczeń CO (kwadrat),  $CO_2$  (kółko), HC (romb) oraz  $NO_x$  (gwiazdka) w 3-wymiarowych kostkach.

Wektor  $\mathbf{x}_{vanM}^r$  reprezentuje stan pracy D:

$$\mathbf{x}_{vanM}^r = [vanM_1 \dots vanM_{45}] \quad (8)$$

Wartości własne macierzy kowariancji  $\mathbf{X}_{vanM}^r$  przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Wartości własne odpowiadające zmienności emisji zanieczyszczeń CO (kwadrat), CO<sub>2</sub> (kołko), HC (romb) oraz NO<sub>x</sub> (gwiazdka) w 4-wymiarowych kostkach.

Na podstawie wyników uzyskanych za pomocą metody PCA, formalnie i w sposób ścisły stwierdzono bardzo dużą zmienność emisji zanieczyszczeń w 1-wymiarowych kostkach zdefiniowanych prędkością. Wraz ze wzrostem wymiaru badanych kostek (2-, 3-, 4-wymiary, odpowiednio: przyspieszenie, prędkość obrotowa, moment obrotowy), stwierdzono różnicowanie się zmienności reprezentowane wartościami własnymi powyżej wartości 1 – narastanie zmienności, oraz dążących do wartości 0 – zanikanie zmienności.

### 3. WNIOSKI

Analiza wyników eksperymentu przeprowadzonego z wykorzystaniem PEMS wykazała istotną zmienność emisji zanieczyszczeń CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> w pomiarowych stanach pracy.

Przeprowadzone badania zmienności emisji zanieczyszczeń wykazały skuteczność zastosowanej metody wielowymiarowej analizy statystycznej Principal Component Analysis (PCA) oraz wykresów radarowych.

Przyjęta metoda badania zmienności emisji CO, CO<sub>2</sub>, HC oraz NO<sub>x</sub> dla przyjętej wielowymiarowej przestrzeni stanów (prędkość, przyspieszenie, prędkość obrotowa, moment obrotowy) wymaga weryfikacji związanej z przeprowadzeniem dalszych badań eksperymentalnych, analitycznych i numerycznych.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Barczak A.: *Metoda analizy składników głównych w ocenie wyników eksperymentu*, Pojazdy Szynowe 2008, XVIII Konferencja Naukowa, Katowice-Ustroń, 2008.
- [2] Jehlik H., *Challenge X 2008 – Hybrid Powered Vehicle On-Road Emissions Findings and Optimization Techniques: A 4 Year Summary*, Sensors 5th Annual SUN (SEMTECH User Network) Conference, 25-26.09.2008.
- [3] Johnson K., Durbin T., Cocker D., Miller J., Agama R., Moynahan N., Nayak G., *On-Road Evaluation of a PEMS for Measuring Gaseous In-Use Emissions from a Heavy-Duty Diesel Vehicle*, SAE Technical Paper Series 2008-01-1300.
- [4] Jolliffe J.: *Principal Component Analysis*, Springer, 2002.
- [5] Rapone M., Ragione L., Meccariello G., *Characterization of Real-World Bus Driving Behavior for Emission Evaluation*, SAE Technical Paper Series 2007-24-0112.
- [6] MATLAB 7.04.