

# ANALIZA KORELACJI EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ I STANÓW PRACY SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

ZDZISŁAW CHŁOPEK<sup>1</sup>

Politechnika Warszawska

## Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań korelacyjnych natężenia emisji zanieczyszczeń i stanów pracy silnika, determinujących emisję zanieczyszczeń. Badania wykonano dla silnika o zapłonie samoczynnym Cummins 6C8.3 w teście dynamicznym NRTC (Non-Road Transient Cycle – test przejściowy silników spalinowych maszyn niedrogowych). Jako wielkości stanu pracy silnika, determinujące emisję zanieczyszczeń, przyjęto: prędkość obrotową, moment obrotowy i moc użyteczną. Przedstawiono zależności korelacyjne natężenia emisji zanieczyszczeń od stanów pracy silnika. Wyznaczono modele matematyczne natężenia emisji zanieczyszczeń jako funkcje wielomianowe stopnia drugiego prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Do analizy korelacji badanych zbiorów wykorzystano teorię korelacji liniowej Pearsona, korelacji rang Spearmana, korelacji gamma Kruskala i korelacji tau Kendalla. Stwierdzono, że istnieje statystyczne uzasadnienie traktowania badanych par zbiorów wielkości fizycznych jako silnie skorelowanych. Oceniono, że podobny jest wpływ wielkości stanu pracy silnika na natężenie emisji tlenu węgla i natężenia emisji węglowodorów w odróżnieniu od wpływu na natężenie emisji tlenków azotu. Dominującym czynnikiem dla natężenia emisji tlenu węgla i natężenia emisji węglowodorów jest prędkość obrotowa, natomiast dla natężenia emisji tlenków azotu – moment obrotowy i moc użyteczna.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, testy dynamiczne, emisja zanieczyszczeń, analiza korelacji

## 1. Wstęp

Pracę silnika spalinowego opisują warunki pracy oraz stan pracy [5, 8], który z kolei jest określony wielkościami charakteryzującymi tę pracę w warunkach typowego użytkowania silnika, a więc m.in. wielkościami charakteryzującymi [8, 9]:

- właściwości energetyczne ze względu na możliwość wykonania pracy, takie jak: moc użyteczna, moment obrotowy, prędkość obrotowa, średnie ciśnienie użyteczne itd.,

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, e-mail: zchlopek@simr.pw.edu.pl, tel. 22 234 85 59

- procesy zachodzące w silniku, podlegające sterowaniu, przede wszystkim sterowanie silnika przez operatora,
- właściwości ekonomiczne ze względu na zużycie paliwa, takie jak: sprawność użytkowa, jednostkowe zużycie paliwa itd.,
- właściwości cechujące procesy towarzyszące pracy silnika, m.in. właściwości ekologiczne ze względu na emisję zanieczyszczeń oraz emisję hałasu, np. natężenie hałasu i jego poziom, czy ciśnienie akustyczne hałasu,

Warunki pracy silnika są zdeterminowane [8, 9]:

- warunkami otoczenia, mającymi wpływ na opory pracy pojazdu lub maszyny, oraz warunkami atmosferycznymi,
- sterowaniem silnika przez operatora,
- momentem oporu, zależnym od charakteru pracy wykonywanej przez pojazd lub maszynę.

Spośród wielkości stanu pracy silnika spalinowego można wyróżnić te, które determinują jego właściwości użytkowe. Są to wielkości charakteryzujące intensywność wykonywanej przez silnik pracy, opisywaną mocą użyteczną, oraz stan cieplny silników, określany temperaturami ich części i układów [8, 9].

Do opisu wielkości charakteryzujących intensywność pracy wykonywanej przez silnik wykorzystuje się przede wszystkim moment obrotowy, opisujący obciążenie silnika, i prędkość obrotową [8, 9]. Jako miarę obciążenia silnika można przyjąć również sterowanie silnika przez jego operatora [8, 9].

Funkcja o wartościach liczbowych, której zmienną niezależną jest czas lub monotoniczna funkcja czasu, jest nazywana procesem [24]. Konsekwentnie do przyjętych nazw wielkości, opisujących pracę silnika spalinowego, można wyróżnić procesy: pracy silnika, warunków pracy silnika oraz stanu pracy silnika [5]. W przypadku, gdy proces jest zmienny w czasie, nazywamy go dynamicznym [8]. W silnikach spalinowych można zatem wyróżnić: dynamiczny proces pracy silnika, dynamiczny proces warunków pracy silnika i dynamiczny proces stanu pracy silnika. Analogicznie klasyfikuje się w opisie pracy silnika jego procesy statyczne. Ze względu na tradycyjnie stosowane nazewnictwo oraz w celu uzasadnionego uproszczenia terminologicznego przyjęło się skrótowo nazywać: procesy dynamiczne warunków pracy silnika – warunkami dynamicznymi pracy silnika, warunkami dynamicznymi, procesy dynamiczne stanu pracy silnika – stanami dynamicznymi pracy silnika (w skrócie: stanami dynamicznymi). Analogicznie upraszcza się nazewnictwo warunków i stanów statycznych.

Trzy wielkości używane do opisu obciążenia silnika: sterowanie silnika przez operatora, moment obrotowy silnika i jego prędkość obrotowa są ze sobą zależne. W warunkach statycznych jest to zależność funkcyjna o wartościach liczbowych, w warunkach dynamicznych – zależność operatorowa [8, 9].

Zależność właściwości użytkowych silników spalinowych od determinujących je stanów w warunkach statycznych jest w postaci funkcyjnej, natomiast w warunkach

dynamicznych właściwości użytkowe silników spalinowych zależą od przebiegu stanów determinujących te właściwości [8, 9]. W związku z tym, w warunkach dynamicznych silniki spalinowe nie mają w ogóle właściwości immanentnych, niezależnych od stanów, w jakich silniki się znajdują. Z tego powodu, w celu opisu właściwości użytkowych silników spalinowych w warunkach dynamicznych, na badany układ nakłada się określone więzy w postaci porównywalnych powtarzalnych warunków [8, 9]. Pozwala to uzyskać uśrednione charakterystyki, np. emisję drogową zanieczyszczeń w testach jezdnych, w których określony przebieg prędkości pojazdu determinuje prędkość obrotową i moment obrotowy [30].

Celem niniejszej pracy jest zbadanie zależności właściwości ekologicznych silnika o zapłonie samoczynnym w postaci natężenia emisji zanieczyszczeń od stanów pracy determinujących te właściwości w teście dynamicznym NRTC (Non-Road Transient Cycle – test przejściowy silników spalinowych maszyn niedrogowych) [30]. Ponieważ badaniom poddawano silnik nagrany do temperatury ustabilizowanej jego eksploatacji, jako wielkości determinujące te właściwości (dla stałych – w warunkach badań – charakterystyk sterowania silnika) mogą być przyjęte: prędkość obrotowa i moment obrotowy, a także moc użyteczna. Do badania tych zależności postanowiono wykorzystać teorie korelacji. W badaniach zastosowano teorię korelacji liniowej Pearsona [25] oraz nieparametryczne teorie korelacji: rang Spearmana [28], gamma Kruskala [22] i tau Kendalla [20]. W pracy z dwóch powodów celowo nie ograniczono się do wykorzystania zazwyczaj powszechnie wykorzystywanej teorii Pearsona. Po pierwsze, teoria Pearsona dotyczy zależności wyłącznie liniowej, a pozostałe korelacje umożliwiają ocenę również zależności nieliniowej. Po drugie, ocena korelacji na podstawie teorii Pearsona jest bardzo wrażliwa na tzw. nadmiar obserwacji odstających [28]. Zastosowane przez Spearmana tzw. rangowania, tzn. zastąpienie pierwotnych zmiennych rangami, czyli numerami kolejnych obserwacji w próbie po uporządkowaniu obserwacji według wartości jednej ze zmiennych, umożliwia osiągnięcie znacznie mniejszej wrażliwości oceny korelacji na obserwacje odstające [28]. Podobnie inne nieparametryczne teorie są mniej wrażliwe na obserwacje odstające niż korelacja Pearsona [20, 22, 28].

W literaturze spotyka się głównie zastosowanie do badania procesów zachodzących w silnikach spalinowych teorii korelacji liniowej Pearsona [2, 3, 6, 7, 11–19, 21, 23, 26, 29], a tylko w nielicznych pracach występuje analiza poszerzona o nieparametryczne teorie korelacji [2, 3, 6, 7, 11, 14, 19, 29]. Znaczna część prac dotyczy związków korelacyjnych właściwości silników spalinowych z wielkościami charakteryzującymi procesy zachodzące w silnikach, czy np. właściwości paliw. Rozpatruje się [12] związki korelacyjne limitów emisji drogowej zanieczyszczeń, występujących w przepisach europejskich oraz analizuje się wpływ zastosowanych rozwiązań technicznych na właściwości ekologiczne silników spalinowych ze względu na emisję zanieczyszczeń. W pracy [10] badany jest wpływ sprawności cieplnej silnika spalinowego na emisję tlenków azotu dla paliw zawierających estry olejów roślinnych. Są także badane [21] zależności parametrów procesu spalania na intensywność powstawania w cylindrach tlenków azotu. Tematem pracy [17] są modele korelacyjne emisji cząstek stałych i wielkości charakteryzujących zadymienie spalin. Zaprezentowano również wyniki

związków emisji zanieczyszczeń ze współczynnikiem recyrkulacji spalin. Badano [15] zależność korelacyjną parametrów paliw z dodatkami biokomponentów i parametrów procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym, jak również wpływ parametrów paliw na jednostkowe zużycie paliwa i emisję jednostkową zanieczyszczeń. W pracy [23] przeprowadzono analizę korelacyjną emisji jednostkowej zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym, badanego w ośmifazowym teście statycznym [30]. Silnik był zasilany 12 rodzajami paliw. A w [18] dokonano analizy korelacyjnej parametrów paliw do silników o zapłonie samoczynnym. Przeprowadzono również badania wrażliwości emisji zanieczyszczeń na parametry paliw w różnych obszarach statycznych stanów pracy silnika. W pracy [16] analizowano właściwości dwóch silników o zapłonie samoczynnym do napędu generatora prądu elektrycznego i kosiarki. Silniki zasilano sześcioma rodzajami paliw pochodzących z przeróbki zużytych olejów roślinnych. Przeprowadzono analizę korelacyjną wskaźnika emisji zanieczyszczeń. W pracy [29] badano zależność korelacyjną emisji drogowej amoniaku i innych zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym z selektywną redukcją katalityczną tlenków azotu amoniakiem. Silnik był badany w samochodzie na hamowni podwoziowej, w teście NEDC. Interesujące wyniki badań przedstawiono w pracy [19], mianowicie wyniki analizy emisji cząstek stałych: drobnych PM10 i tzw. nanocząstek (o średnich średnicach aerodynamicznych mniejszych niż 100 nm) z silnika o zapłonie samoczynnym do napędu autobusu miejskiego. Badania wykonano w warunkach rzeczywistej eksploatacji autobusu. Przedstawiono wyniki badań zależności korelacyjnej emisji cząstek stałych, m.in. od stanów pracy silnika. W pracy [11] zaprezentowano wyniki analizy zależności emisji drogowej zanieczyszczeń z silników spalinowych lekkich samochodów ciężarowych w różnych testach jezdnych. W pracy [14] ocenia się korelację między wynikami badań emisji drogowej zanieczyszczeń w testach na hamowni i w rzeczywistej eksploatacji. Interesujące wyniki badań, dotyczące zależności korelacyjnych emisji zanieczyszczeń ze średnioobrotowych okrętowych silników spalinowych, przedstawiono w [26]. W [2] natomiast – wyniki badań korelacyjnych właściwości okrętowego silnika spalinowego w statycznych warunkach pracy, a w [4] – w stanach dynamicznych.

W pracy [7] przedstawiono wyniki badań korelacyjnych emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie iskrowym, a w [6] – silnika o zapłonie samoczynnym. W pracy [4] zajęto się badaniem związków natężenia emisji zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym ze stanami, determinującymi emisję zanieczyszczeń, z zastosowaniem funkcji korelacji wzajemnej badanych procesów.

W literaturze spotyka się nieliczne prace dotyczące wyników badań korelacyjnych właściwości silników spalinowych i ich stanów pracy, determinujących te właściwości, nie tylko w warunkach dynamicznych, ale i w warunkach statycznych. Z tego powodu podjęto tę tematykę w niniejszej pracy, traktując badania korelacyjne właściwości silników spalinowych od stanów dynamicznych ich pracy jako sposób zdobycia wiedzy na temat właściwości silników spalinowych w warunkach dynamicznych.

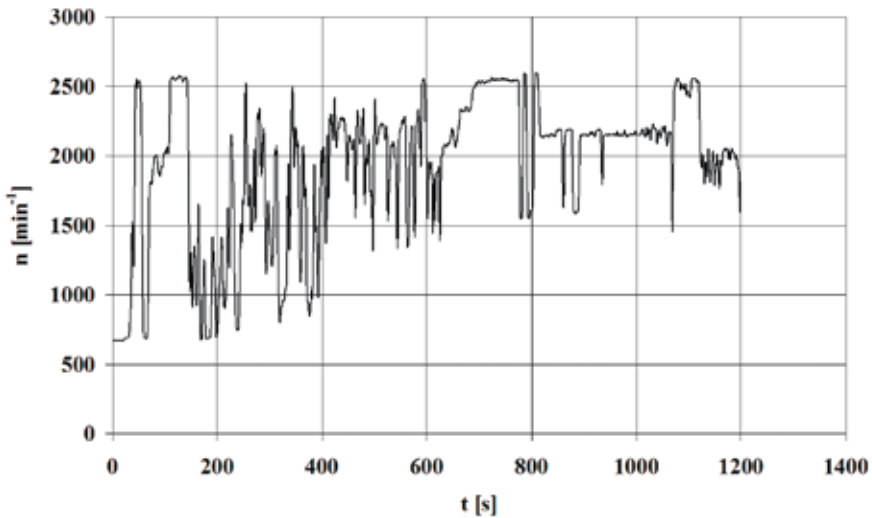
## 2. Wyniki badań

Obiektem badań empirycznych był turbodoładowany sześciocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym Cummins 6C8.3 o objętości skokowej 8,3 dm<sup>3</sup>. Badania zostały wykonane w ramach realizacji pracy [1]. Badania silnika spalinowego przeprowadzono na stanowisku wyposażonym m.in. w:

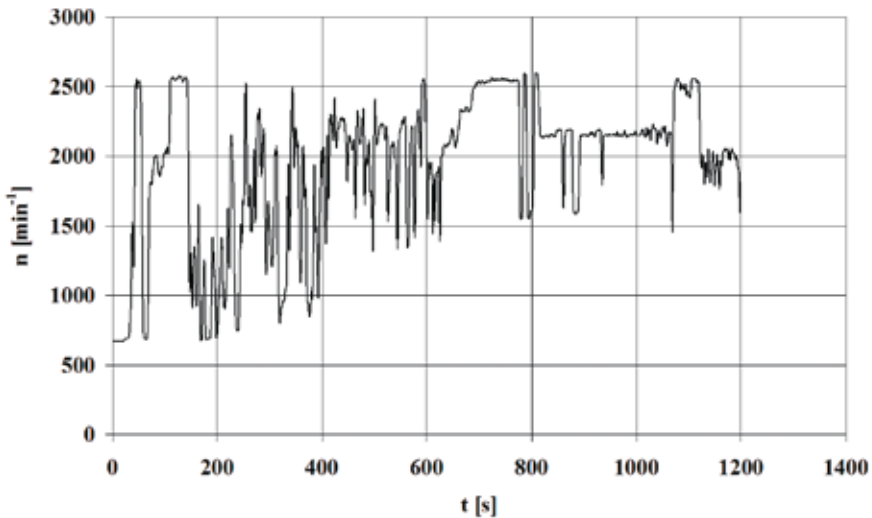
- hamulec elektryczny AFA-E 460/4,4-9 EU produkcji firmy AVL,
- miernik cyfrowy prędkości obrotowej i momentomierz T10F produkcji firmy HBM,
- zespół analizatorów spalin CEB II produkcji firmy AVL,
- układ do pomiaru emisji cząstek stałych: tunel rozcieńczający częściowego przepływu Smart Sampler SPC 472 produkcji firmy AVL oraz mikrowaga MT5 produkcji firmy Mettler Toledo,
- układ do pomiaru zużycia paliwa typu 735 wraz z urządzeniem do stabilizacji temperatury paliwa produkcji firmy AVL,
- układ do pomiaru zużycia powietrza typu Sensyflow P.

W niniejszej pracy badaniom poddano procesy natężenia emisji zanieczyszczeń oraz prędkości obrotowej, momentu obrotowego i mocy użytecznej. Sygnały zostały zsynchronizowane z uwzględnieniem miejsca poboru spalin w układzie wylotowym (uwzględniono opóźnienie poszczególnych sygnałów, związane z analizą spalin). Badane sygnały poddano przetwarzaniu w celu wyeliminowania błędów grubych i zmniejszenia udziału zakłóceń o dużych częstotliwościach. Pomiaru były próbkowane z częstotliwością 10 Hz. Błędy grube zidentyfikowano metodą analizy bieżącej wariancji wyników pomiarów. Do zmniejszenia udziału w sygnałach szumów o dużych częstotliwościach zastosowano filtr dolnoprzepustowy Golaya-Savitzky'ego [27], z wielomianem drugiego stopnia oraz z aproksymacją obustronną po 5 punktów.

Badania przeprowadzono w teście dynamicznych NRTC, przeznaczonym dla silników spalinowych maszyn niedrogowych, w stanie silnika nagrzanego do temperatury typowej eksploatacji. Na rysunku 1 przedstawiono przebieg prędkości obrotowej silnika w teście NRTC, natomiast na rysunku 2 – przebieg momentu obrotowego.

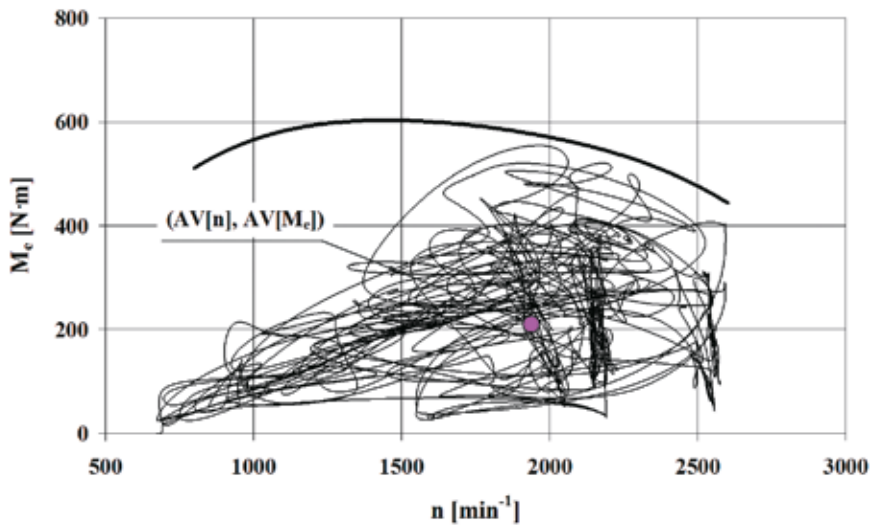


Rys. 1. Przebieg prędkości obrotowej -  $n$  w dziedzinie czasu -  $t$  w teście NRTC



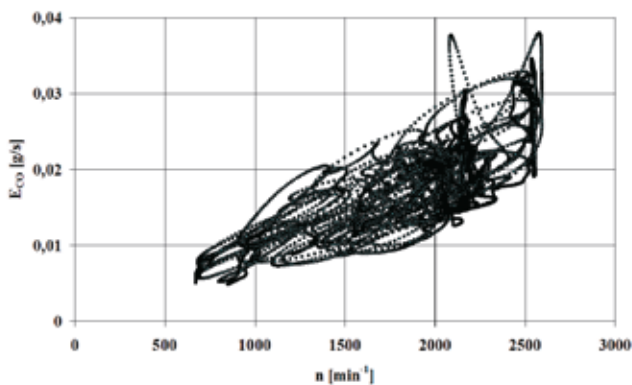
Rys. 2. Przebieg momentu obrotowego -  $M_e$  w dziedzinie czasu -  $t$  w teście NRTC

Na rysunku 3 został przedstawiony zbiór stanów pracy silnika spalinowego w teście NRTC na tle zewnętrznej charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego. Na wykresie zaznaczono punkt o współrzędnych: wartość średnia prędkości obrotowej - wartość średnia momentu obrotowego w teście.

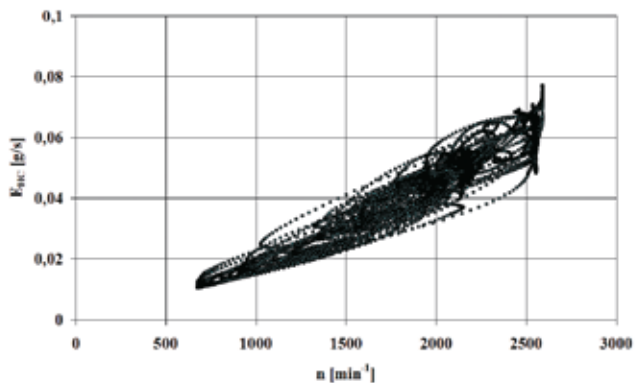


**Rys. 3. Zbiór stanów pracy silnika spaliniowego w teście NRTC na tle zewnętrznej charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego ( $n$  – prędkość obrotowa,  $AV[n]$  – wartość średnia prędkości obrotowej,  $AV[M_e]$  – wartość średnia momentu obrotowego)**

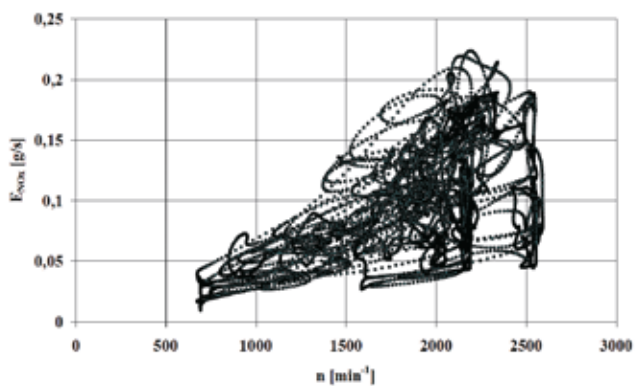
Na rysunkach 4–6 przedstawiono zależność korelacyjną natężenia emisji zanieczyszczeń z prędkością obrotową, na rysunkach 7–9 z momentem obrotowym, a na rysunkach 10–12 z mocą użyteczną.



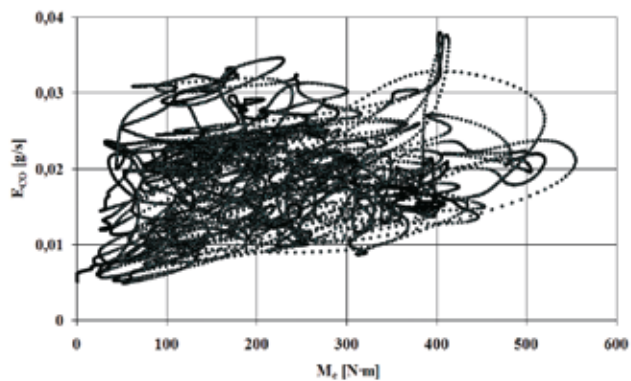
**Rys. 4. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenku węgla –  $E_{co}$  i prędkości obrotowej –  $n$  w teście NRTC**



Rys. 5. Zależność korelacyjna natężenia emisji węglowodorów -  $E_{HC}$  i prędkości obrotowej -  $n$  w teście NRTC

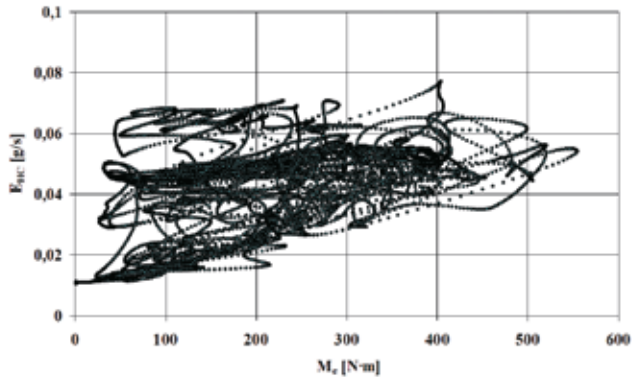


Rys. 6. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenków azotu -  $E_{NOx}$  i prędkości obrotowej -  $n$  w teście NRTC

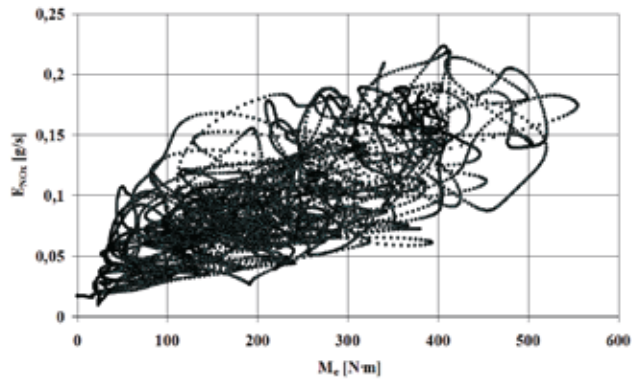


Rys. 7. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenku węgla -  $E_{CO}$  i momentu obrotowego -  $M_e$  w teście NRTC

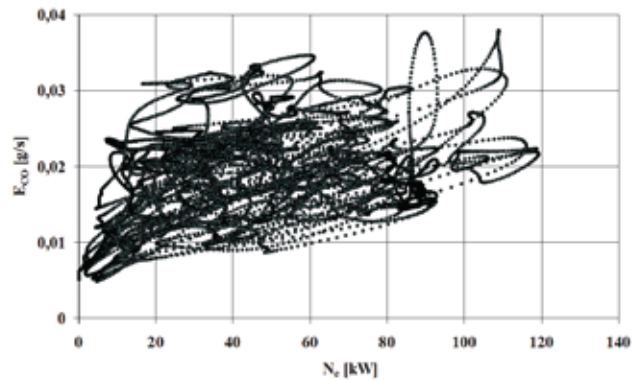




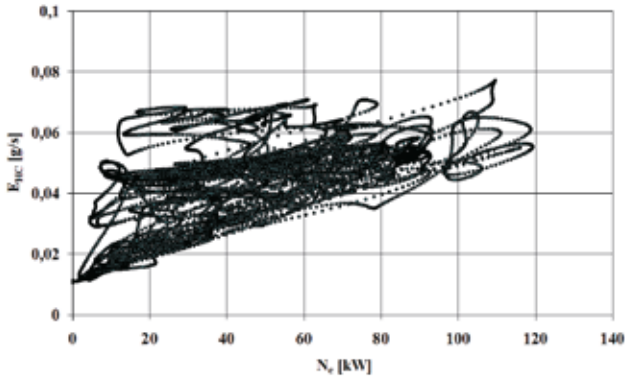
Rys. 8. Zależność korelacyjna natężenia emisji węglowodorów -  $E_{HC}$  i momentu obrotowego -  $M_e$  w teście NRTC



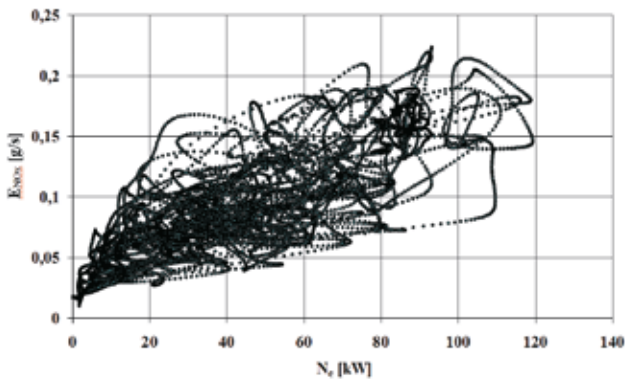
Rys. 9. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenków azotu -  $E_{NOx}$  i momentu obrotowego -  $M_e$  w teście NRTC



Rys. 10. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenku węgla -  $E_{CO}$  i mocy użytecznej -  $N_e$  w teście NRTC



Rys. 11. Zależność korelacyjna natężenia emisji węglowodorów -  $E_{HC}$  i mocy użytecznej -  $N_e$  w teście NRTC



Rys. 12. Zależność korelacyjna natężenia emisji tlenków azotu -  $E_{NOx}$  i mocy użytecznej -  $N_e$  w teście NRTC

W celu oceny trendów zależności natężenia emisji zanieczyszczeń od prędkości obrotowej i momentu obrotowego, dokonano aproksymacji zależności natężenia emisji zanieczyszczeń od zmiennych niezależnych funkcją wielomianową stopnia drugiego. Uzyskano następujące modele matematyczne natężenia emisji zanieczyszczeń:

- tlenku węgla:

$$E_{CO} = 4,8 \cdot 10^{-3} - 7,5527 \cdot 10^{-7} \cdot n + 3,5754 \cdot 10^{-5} \cdot M_e + 4,1752 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2,1174 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot M_e + 6,0097 \cdot 10^{-9} \cdot M_e^2 \quad (1)$$

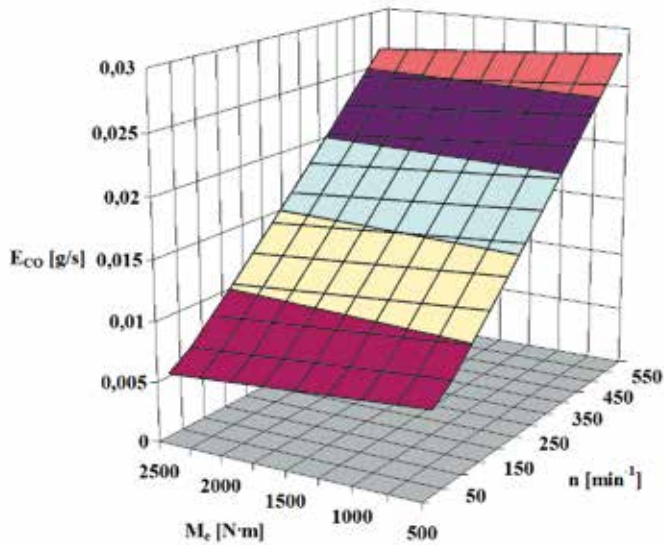
- węglowodorów:

$$E_{HC} = 2,7 \cdot 10^{-3} + 7,7325 \cdot 10^{-6} \cdot n + 1,5361 \cdot 10^{-5} \cdot M_e + 6,0363 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1,0246 \cdot 10^{-8} \cdot n \cdot M_e + 4,9663 \cdot 10^{-8} \cdot M_e^2 \quad (2)$$

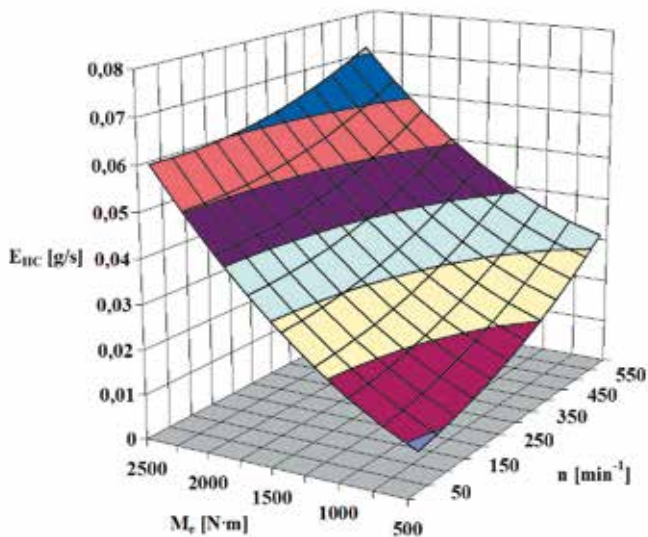
- tlenków azotu:

$$E_{NOx} = -1,68 \cdot 10^{-2} + 7,1256 \cdot 10^{-5} \cdot n - 1 \cdot 10^{-4} \cdot M_e - 1,9456 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 1,6266 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot M_e + 5,7869 \cdot 10^{-8} \cdot M_e^2 \quad (3)$$

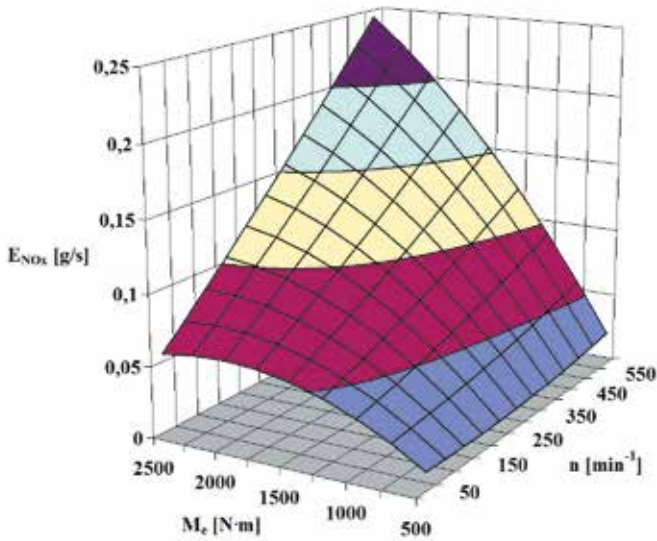
Na rysunkach 13–15 przedstawiono wykresy ilustrujące modele matematyczne natężenia emisji zanieczyszczeń jako funkcji prędkości obrotowej i momentu obrotowego.



Rys. 13. Wykres funkcji wielomianowej stopnia drugiego, aproksymującej zależność natężenia emisji tlenku węgla -  $E_{CO}$  od prędkości obrotowej -  $n$  i momentu obrotowego -  $M_e$ .



Rys. 14. Wykres funkcji wielomianowej stopnia drugiego, aproksymującej zależność natężenia emisji węglowodorów -  $E_{HC}$  od prędkości obrotowej -  $n$  i momentu obrotowego -  $M_e$ .



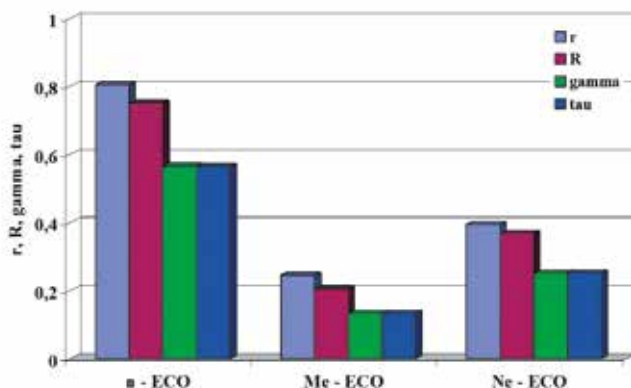
**Rys. 15. Wykres funkcji wielomianowej stopnia drugiego, aproksymującej zależność natężenia emisji tlenków azotu -  $E_{\text{Nox}}$  od prędkości obrotowej -  $n$  i momentu obrotowego -  $M_e$ .**

Tendencje natężenia emisji zanieczyszczeń jako funkcji poszczególnych zmiennych niezależnych są podobne. Wszystkie wielkości – oprócz natężenia emisji tlenku węgla (natężenie emisji tlenku węgla jest malejącą funkcją momentu obrotowego) – są rosnącymi funkcjami zmiennych niezależnych, natomiast znacznie różni się wrażliwość natężenia emisji poszczególnych zanieczyszczeń na prędkość obrotową i moment obrotowy.

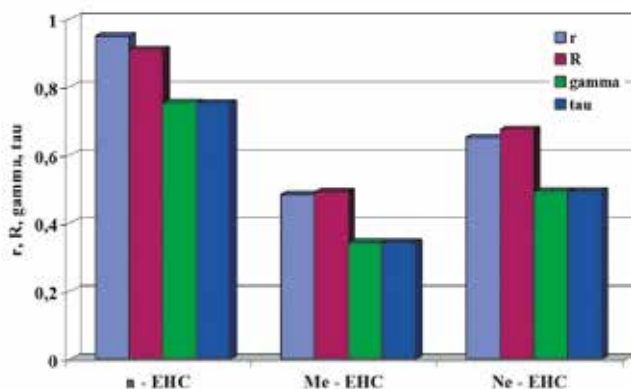
Na rysunkach 16–18 przedstawiono współczynniki: korelacji liniowej Pearsona, korelacji rang Spearmana, korelacji gamma Kruskala i korelacji tau Kendalla natężenia emisji zanieczyszczeń z: prędkością obrotową, momentem obrotowym i mocą użyteczną. Zaprezentowana konfiguracja wielkości jest zestawiona tak, aby możliwe było porównanie współczynników korelacji natężenia emisji poszczególnych zanieczyszczeń ze wszystkimi wielkościami stanu, determinującymi emisję zanieczyszczeń.

Mimo zróżnicowanych wartości współczynników korelacji, mieszczących się w granicach  $0,13 \div 0,95$ , prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotezy o braku korelacji w niniejszej pracy we wszystkich analizowanych przypadkach mniejsze od 0,01, co wynika z bardzo dużej liczności badanych zbiorów [13], wynoszącej 12000.

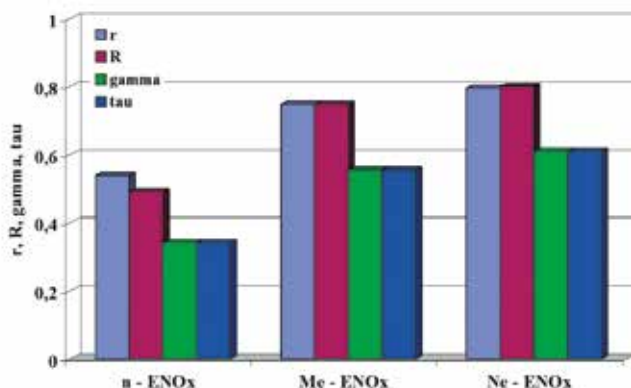
Istnieją zasadnicze różnice w zależności od zmiennych niezależnych: natężenia emisji tlenku węgla i natężenia emisji węglowodorów – z jednej strony oraz natężenia emisji tlenków azotu – z drugiej. Współczynniki korelacji natężenia emisji tlenku węgla i natężenia emisji węglowodorów mają wartości wyraźnie większe z prędkością obrotową, natomiast z momentem obrotowym i mocą użyteczną są większe wartości współczynników korelacji natężenia emisji tlenków azotu. Jest to zgodne z oczekiwaniem, gdyż czynnikiem



Rys. 16. Współczynniki: korelacji liniowej Pearsona - r, korelacji rang Spearmana - R, korelacji gamma Kruskala- gamma i korelacji tau Kendalla - tau natężenia emisji tlenku węgla - ECO z: prędkością obrotową - n, momentem obrotowym - Me i mocą użyteczną - Ne



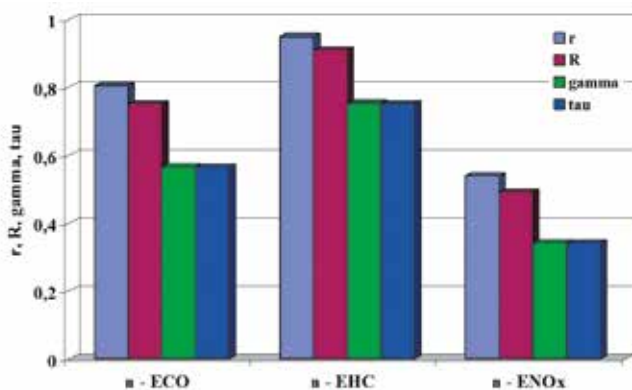
Rys. 17. Współczynniki: korelacji liniowej Pearsona - r, korelacji rang Spearmana - R, korelacji gamma Kruskala- gamma i korelacji tau Kendalla - tau natężenia emisji węglowodorów - EHC z: prędkością obrotową - n, momentem obrotowym - Me i mocą użyteczną - Ne



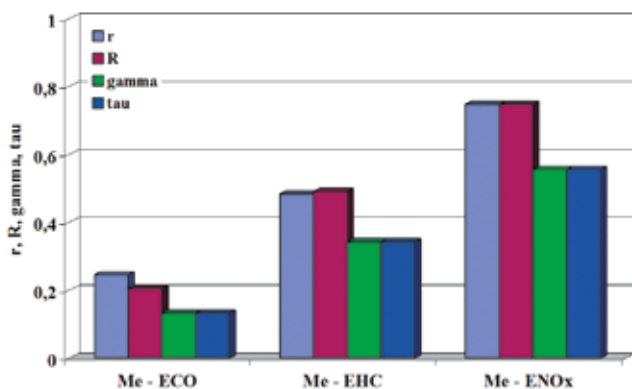
Rys. 18. Współczynniki: korelacji liniowej Pearsona - r, korelacji rang Spearmana - R, korelacji gamma Kruskala- gamma i korelacji tau Kendalla - tau natężenia emisji tlenków azotu - ENox z: prędkością obrotową - n, momentem obrotowym - Me i mocą użyteczną - Ne

determinującym emisję tlenków azotu jest temperatura czynnika w cylindrach silnika, a jest to wielkość rosnąca wraz ze zwiększaniem się obciążeniem silnika.

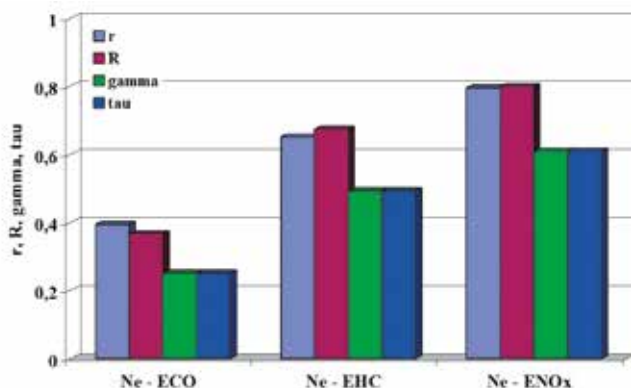
Na rysunkach 19–21 pokazano współczynniki: korelacji liniowej Pearsona, korelacji rang Spearmana, korelacji gamma Kruskala i korelacji tau Kendalla prędkości obrotowej (rysunek 19), momentu obrotowego (rysunek 20) i mocy użytecznej (rysunek 21) z natężeniem emisji zanieczyszczeń. Przedstawioną konfigurację wielkości zestawiono w celu porównania między sobą współczynników korelacji natężenia emisji poszczególnych zanieczyszczeń ze wszystkimi wielkościami stanu determinującymi emisją zanieczyszczeń.



Rys. 19. Współczynniki: korelacji liniowej Pearsona - r, korelacji rang Spearmana - R, korelacji gamma Kruskala- gamma i korelacji tau Kendalla - tau prędkości obrotowej - n z: natężeniem emisji tlenku węgla - ECO, natężeniem emisji węglowodorów - EHC i natężeniem emisji tlenków azotu - ENOx



Rys. 20. Współczynniki: korelacji liniowej Pearsona - r, korelacji rang Spearmana - R, korelacji gamma Kruskala- gamma i korelacji tau Kendalla - tau momentu obrotowego - Me z: natężeniem emisji tlenku węgla - ECO, natężeniem emisji węglowodorów - EHC i natężeniem emisji tlenków azotu - ENOx



Rys. 21. Współczynniki: korelacji liniowej Pearsona – r, korelacji rang Spearmana – R, korelacji gamma Kruskala– gamma i korelacji tau Kendalla – tau mocy użytecznej – Ne z: natężeniem emisji tlenu węgla – ECO, natężeniem emisji węglowodorów – EHC i natężeniem emisji tlenków azotu – ENOX

Prędkość obrotowa jest najsilniej skorelowana z natężeniem emisji węglowodorów i – na nieznacznie niższym poziomie – z natężeniem emisji tlenu węgla. Natomiast w przypadku momentu obrotowego i mocy użytecznej najsilniejsza jest korelacja z natężeniem emisji tlenków azotu, a najsłabsza – z natężeniem emisji tlenu węgla.

### 3. Podsumowanie

W podsumowaniu przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski na temat zależności – w warunkach dynamicznego testu NRTC – natężenia emisji zanieczyszczeń od wielkości stanu pracy silnika, determinujących emisję zanieczyszczeń:

1. Pomimo zróżnicowanych wartości współczynników korelacji (0,13 – 0,95) istnieje statystyczne uzasadnienie traktowania badanych par zbiorów wielkości fizycznych jako silnie skorelowanych – prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji jest we wszystkich analizowanych przypadkach mniejsze od 0,01.
2. Mimo że do oceny korelacji użyto różnych testów, tendencje wyników obliczonych współczynników korelacji są jakościowo podobne.
3. Dla natężenia emisji tlenu węgla i natężenia emisji węglowodorów wpływ wielkości stanu pracy silnika jest podobny w odróżnieniu od wpływu na natężenie emisji tlenków azotu. Dominującym czynnikiem dla natężenia emisji tlenu węgla i natężenia emisji węglowodorów jest prędkość obrotowa, natomiast dla natężenia emisji tlenków azotu – moment obrotowy i moc użyteczna.



Uzyskane wyniki dotyczą badań w teście NRTC, a więc zarówno w określonych stanach statycznych, jak i dla określonych właściwości stanów dynamicznych. Jest – w związku z tym – celowe rozszerzenie programu badań na inne warunki badań: zarówno w innych testach stosowanych w procedurach homologacyjnych, jak i w testach specjalnych.

## Literatura

- [1] Budney E, Chłopek Z., Chłosta M.: *Ocena skuteczności zasilania silnika spalinowego gazem ziemnym w celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń w warunkach użytkowania silnika w maszynie do robót ziemnych – ciągniku gąsienicowym*. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 9 T12 D 013 23. Warszawa 2009. (Praca niepublikowana).
- [2] Chłopek Z., Piaseczny L.: *Analiza korelacyjna właściwości silnika spalinowego w statycznych warunkach pracy*. Mechanika z. 6-M/2004. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004, s. 163–170.
- [3] Chłopek Z., Piaseczny L.: *Correlational investigation of pollutant emissions from a marine engine in dynamic states*. V International Congress on Combustion Engines 2013. V International Congress on Combustion Engines 2013. Combustion Engines 2013.
- [4] Chłopek Z., Szczepański T.: *Correlation research of combustion engines properties in dynamic states*. V International Congress on Combustion Engines 2013. Combustion Engines 2013.
- [5] Chłopek Z., Szczepański T.: *Research concept of the combustion engines properties in dynamic states*. V International Congress on Combustion Engines 2013. Combustion Engines 2013.
- [6] Chłopek Z.: *A correlation analysis of the pollutant emission from a self ignition engine*. Silniki Spalinowe – Combustion Engines 1(140)/2010, s. 25–32.
- [7] Chłopek Z.: *Badania korelacyjne emisji zanieczyszczeń z silnika spalinowego*. Mechanika z. 6-M/2004. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004, s. 151–156.
- [8] Chłopek Z.: *Some remarks on engine testing in dynamic states*. Silniki Spalinowe – Combustion Engines 4/2010(143), s. 60–72.
- [9] Chłopek, Z.: *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
- [10] Deshmukh S.J. et al.: *Mathematical correlation for brake thermal efficiency and NOx emission of CI engine using ester of vegetable oils*. World Academy of Science, Engineering and Technology 27 2009, s. 697–702.
- [11] *Development of emission rates for light-duty vehicles in the motor vehicle emissions simulator (MOVES2009)*. Draft Report EPA-420-P-09-002. Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency, 2009.
- [12] Fiebig M. et al.: *Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions*. Journal of Occupational Medicine and Toxicology 2014, 9:6. <http://www.occup-med.com/content/9/1/6>. 2014-08-14.
- [13] Fisz M.: *Probability theory and mathematical statistics*. Wiley. New York 1963.
- [14] Franco V. et al.: *Road vehicle emission factors development: A review*. Atmospheric Environment. Volume 70. May 2013, s. 84–97.
- [15] Gopinath A., Puhans S., Nagarajan G.: *Effect of unsaturated fatty acid esters of biodiesel fuels on combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine*. International Journal of Energy and Environment (IJEE). Volume 1, Issue 3, 2010, s. 411–430.
- [16] Guo J. et al.: *Waste cooking oil biodiesel use in two off-road Diesel engines*. International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy. Volume 2012, Article ID 130782.
- [17] Jagadish D., Kumar P.R., Murthy K.M.: *Performance and emission characteristics of diesel engine run on biofuels based on experimental and semi analytical methods*. International Journal of Energy and Environment (IJEE), Volume 2, Issue 5, 2011, s. 899–908.
- [18] Jekhouni Y. et al.: *Relationship between fuel properties and sensitivity analysis of non-aromatic and aromatic fuels used in a single cylinder heavy duty diesel engine*. SAE 2011-01-0333.



- [19] Kamarianakis Y., Gao H.O.: *Diesel ultrafine/fine particle emissions in numbers: statistical modeling and evaluation of engine operating variables*. Final Report 49777-33-19. University Transportation Research Center. City College of New York. New York 2009.
- [20] Kendall M.G.: *A New measure of rank correlation*. Biometrika 1938; 30, s. 81-89.
- [21] Kitamura Y. et al.: *Fundamental Investigation of NOx Formation in Diesel Combustion under Supercharged and EGR Conditions*. SAE 2005-01-0364.
- [22] Kruskal H., Wallis W.A.: *Use of ranks in one-criterion variance analysis*. Journal of the American Statistical Association 1952; 47(260), s. 583-621.
- [23] Neill W.S. et al.: *Emissions from heavy-duty diesel engine with EGR using fuels derived from oil sands and conventional crude*. SAE 2003-01-3144.
- [24] Papoulis A., Pillai S.U.: *Probability, random variables and stochastic processes*. 4<sup>th</sup> edition. McGraw Hill. 2002.
- [25] Pearson K.: *On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation*. Drapers' Company Research Memoirs. Biometric Ser. I. 1904.
- [26] Sarvi A., Fogelholm C.J., Zevenhoven R.: *Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 2. Influence of fuel type and operating mode*. Fuel Processing Technology 89(2008), s. 520-527.
- [27] Savitzky A., Golay M.J.E.: *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. Analytical Chemistry 1964; 36, s. 1627-1639.
- [28] Spearman Ch.: *The proof and measurement of association between two things*. American Journal of Psychology 1904; 15, s. 72-101.
- [29] Suarez - Bertoa R., Zardini A.A., Astorga C.: *Ammonia exhaust emissions from spark ignition vehicles over the New European Driving Cycle*. Atmospheric Environment 97 (2014), s. 43-53.
- [30] *Worldwide emission standards. Heavy duty & off-road vehicles*. Delphi. Innovation for the real world. 2013/2014.