

## PRÓBA WYZNACZENIA ZALEŻNOŚCI STATYSTYCZNEJ POMIĘDZY PARAMETRAMI DIAGNOSTYCZNYMI SILNIKA POJAZDU POLONEZ, A EMISJĄ SPALIN

Wiesław PIEKARSKI, Sławomir JUŚCIŃSKI

Katedra Energetyki i Pojazdów  
Akademia Rolnicza w Lublinie  
ul. Głęboka 28 20 – 612 Lublin  
tel. (081) 445 61 47, e-mail: wpiek@hortus.ar.lublin.pl

Mirosława WESOŁOWSKA – JANCZAREK

Katedra Zastosowań Matematyki  
Akademia Rolnicza w Lublinie  
ul. Akademicka 13 20 – 950 Lublin  
tel. (081) 445 61 47, e-mail: janczar@ursus.ar.lublin.pl

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano badania silników, które obejmowały pomiary parametrów sygnałów diagnostycznych takich jak: ciśnienie sprężania, względny spadek ciśnienia sprężanego powietrza w cylindrach i skład spalin. Badania sygnałów diagnostycznych względnego spadku ciśnienia sprężanego powietrza w cylindrach i ciśnienia sprężania, wykonywano w dwóch próbach: bez oleju i z olejem wtryskiwanym do cylindra. Jednakże w przypadku silników wyposażonych w katalizator TWC, nie wtryskiwano oleju do cylindra ze względu na realne niebezpieczeństwo uszkodzenia katalizatora.

Słowa kluczowe: pojazd, silnik, emisja spalin, parametry diagnostyczne.

### AN ATTEMPT AT THE DETERMINATION OF THE STATISTICAL INTERDEPENDENCY BETWEEN THE DIAGNOSTIC PARAMETERS OF THE POLONEZ VEHICLE ENGINE AND FUMES EMISSIONS

### Summary

The article presents engine tests involving measurements of the parameters of diagnostic signals such as : compression pressure, relative drop of the compressed air pressure in the cylinders and fume contents. Tests on the diagnostic signals concerning the relative drop of the compressed air pressure in the cylinders and the compression pressure were carried out in two trials: without oil and with oil injected to the cylinder. However, in case of engines with the catalyst TWC, oil was not injected into the cylinder because of the real danger of damage to the catalyst.

Key words: vehicle, engine, fumes emissions, diagnostic parameters.

## 1. WPROWADZENIE

Obecnie przeżywamy przełom cywilizacyjnych epok: cywilizacji kończącej się, nazywanej przemysłową i nadchodzącej, zwanej informacyjną. W procesie przeobrażeń technologicznych, szczególne miejsce zajmują rozwój motoryzacji oraz środków transportu i systemów transportowych.

Ostatnie dziesięciolecie to okres wielkiego boomu motoryzacyjnego. Rozwój motoryzacji, choć nieunikniony, niesie ze sobą szereg zjawisk negatywnych, z których najważniejsze to

zagrożenia dla środowiska naturalnego. Rokrocznie emitowana jest do atmosfery ogromna ilość związków i pyłów, dlatego szerokie wprowadzenie diagnostyki technicznej w systemie eksploatacji pojazdów ma na celu ograniczenie do minimum emisji składników toksycznych spalin [Żółtowski, Jankowski 1999].

## 2. CEL I ZAKRES

Badaniami objęto 30 egzemplarzy silników pojazdu samochodowego „Polonez” 1500/1600. O takim wyborze zdecydowała dostępność

egzemplarzy w różnym stanie technicznym i eksploatowanych w różnych warunkach.

Badaniami objęto silniki o różnym przypadkowo – losowo dobranym okresie pracy. W trakcie badań przyjęto założenia minimalizujące zakłócenia analizy związku składu spalin ze zużyciem układu TPC. Przyjęto następujące warunki dla wszystkich pomiarów:

- silnik zasilany benzyną bezołowiową 95,
- szczelny układ wydechowy,
- silnik doprowadzony do stanu równowagi cieplnej, temperatura cieczy i oleju ok. 60...80°C,
- układ zapłonowy i zasilania oraz luzy zaworowe wg zaleceń producenta,
- sprawny akumulator lub zasilanie z prostownika rozruchowego.

Wykorzystując wieloletnie doświadczenia w zakresie diagnostyki technicznej pojazdów, uznano za celowe przeprowadzenie badań na wybranych pojazdach samochodowych, aby ocenić możliwości praktycznego wykorzystania korelacji składu spalin ze stanem technicznym silnika, szczególnie układu tłok – pierścienie – cylinder (TPC).

Przyjęto, że skład spalin silnika o ZI, może być dobrym nośnikiem informacji diagnostycznych możliwych do wykorzystania w ocenie nie tylko przebiegu procesu spalania, ale przede wszystkim jego stanu technicznego [Merkisz 1992, Piekarski 1997].

Analizę spalin wykonywano dla trzech stanów pracy silnika:

- prędkości obrotowej biegu wolnego;
- średniej prędkości obrotowej – 2000...3000 obr/min.;
- stanu nieustalonego, czyli zwiększeniu na krótko do maksymalnej prędkości obrotowej dla danego silnika i gwałtownym zamknięciu przepustnicy.

Analizę spalin przeprowadzano z wykorzystaniem następujących analizatorów: AWAT AG-4, OLIVER K 90, Radiotechnika AI 9600.

### 3. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Celem analizy statystycznej było ustalenie zależności:

- średniego ciśnienia sprężania,
  - średniego ciśnienia sprężania (próba olejowa),
  - średniej szczelności,
- traktowanych jako zmienne objaśniane (grupa I), od zawartości HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> w spalinach oraz od współczynnika λ przy prędkości obrotowej biegu jałowego, średniej prędkości obrotowej i w stanach nieustalonych, które są uznane jako zmienne objaśniające (gr. II). Zastosowano statystyczną metodę analizy regresji wielokrotnej.

Dla każdej zmiennej z grupy I przeprowadzono regresję krokową postępującą wskazując jako zbiór zmiennych niezależnych wszystkie zmienne z grupy II. Następnie oszacowano równanie regresji względem tych zmiennych z grupy II, które okazały się statystycznie istotne.

Podano tabele zawierające analizy (współczynniki, ich błędy standardowe, wartości funkcji testowej, wartość p) oraz tabele analizy wariancji dla regresji, a ponadto wartości, które wskazują na „dobroć” oszacowania:

- współczynnik determinacji R<sup>2</sup>, który określa, jaka część zmienności zmiennej objaśnianej jest wyjaśniona znalezionym równaniem regresji,
- błąd standardowy oszacowania

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1}} \quad (1)$$

gdzie:

$n$  – liczebność próby,

$k$  – ilość zmiennych objaśniających w równaniu regresji,

$y_i$  – wartość zmiennej objaśnianej w próbie,

$\hat{y}_i$  – wartość wyznaczona z oszacowanego

równania regresji.

W analizie wariancji testowana jest hipoteza H<sub>0</sub>, stwierdzająca, że rozważana regresja nie jest istotna. Jeżeli wartość funkcji testowej jest większa od wartości krytycznej F<sub>α</sub> to hipotezę odrzucamy przy ustalonym poziomie istotności α. Wartość α określa prawdopodobieństwo popełnienia błędu I rodzaju polegającego na odrzuceniu H<sub>0</sub>, mimo, że jest ona prawdziwa. Natomiast wartość p zamieszczana również w tabeli jest funkcją obliczonej wartości funkcji testowej F i wskazuje prawdopodobieństwo, dla którego obliczana wartość funkcji testowej byłaby wartością krytyczną testu. Wartość krytyczna F<sub>α</sub> wyznacza obszar krytyczny testu.

Podano także wykresy rozrzutu zmiennej objaśnianej względem każdej ze zmiennych objaśniających i metodami graficznymi spróbowano pokazać, czy rozkład badanych cech z grupy I jest bliski rozkładowi normalnemu ze stabilną wariancją reszt. Warto tu jeszcze dodać, że test F jest dość odporny na odchylenia od normalności [Kornacki, Mielniczuk 2001].

#### 3.1. Analiza wyników badań pojazdu samochodowego Polonez

Dla kolejnych cech w tabelach (1-8) podano wyniki analizy regresji oraz analizę wariancji dla regresji.

**Zmienna objaśniana: średnie ciśnienie sprężania**

Tab. 1. Wyniki analizy regresji dla średniego ciśnienia sprężania

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(28)	Poziom p
W. wolny	10,86122	0,313531	34,64165	1,55E-24
HC <sub>M/M</sub>	-0,0012	-0,0012	0,000334	0,001181

Tab. 2. Analiza wariancji dla średniego ciśnienia sprężania

	Suma kwadrat.	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	28,19173	1	28,19173	13,46324	0,001181
błąd	60,55443	28	2,162658		
Razem	88,74617				

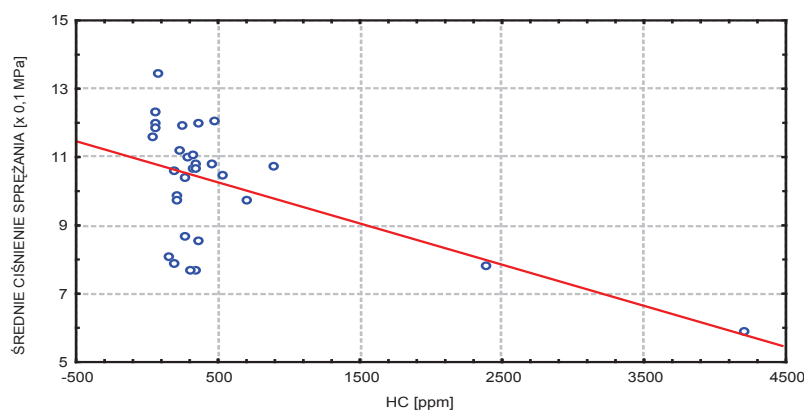
$$R^2=0,318 \quad S_e \approx 1,471$$

**Równanie regresji:**

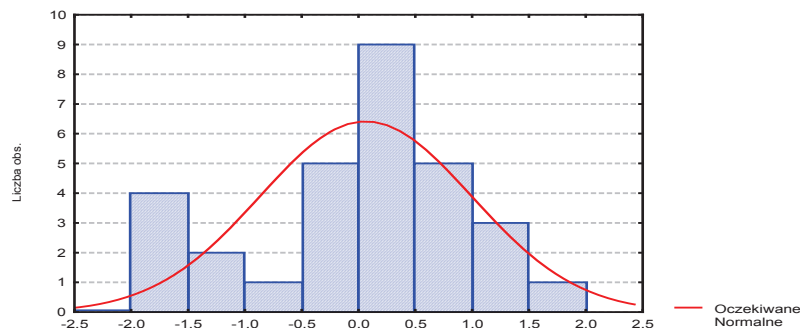
$$\text{ŚREDNIE CIŚNIENIE SPRĘŻANIA} = 10,861 - 0,001 \cdot \text{HC}_{M/M} \quad (2)$$

gdzie: HC<sub>M/M</sub> – zawartość węglowodorów w spalinach w stanach nieustalonych.

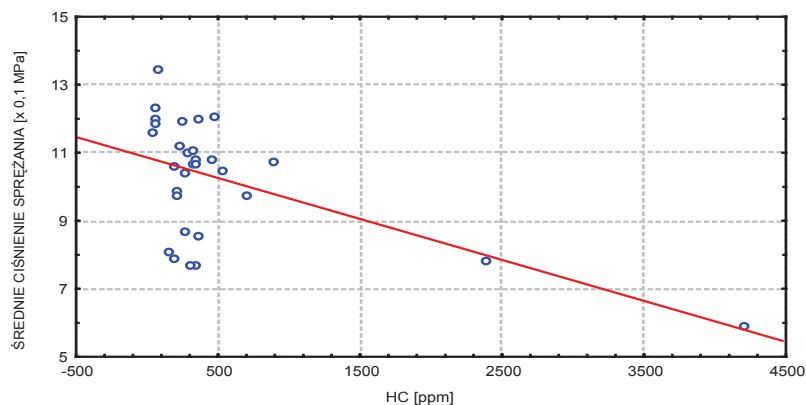
Rysunek 1 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania od zawartości węglowodorów w spalinach, rysunek 2 prezentuje rozkład reszt standaryzowanych, rysunek 3 obrazuje graficznie prawdopodobieństwo reszt.



Rys. 1. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania od zawartości węglowodorów w spalinach dla stanów nieustalonych



Rys. 2. Rozkład reszty standaryzowanej dla analizy średniego ciśnienia sprężania



Rys. 3. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania od zawartości węglowodorów w spalinach dla stanów nieustalonych

### Zmienna objaśniana: średnie ciśnienie sprężania (próba olejowa)

Tab. 3. Wyniki analizy regresji dla średniego ciśnienia sprężania (próba olejowa)

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(28)	Poziom p
W. wolny	12,57466	0,437663	28,73136	2,54E-22
HC <sub>w</sub>	-0,00329	0,001309	-2,51077	0,018097

Tab. 4. Analiza wariancji dla średniego ciśnienia sprężania (próba olejowa)

	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	9,736858	1	9,736858	6,303975	0,018097
błąd	43,24764	28	1,544559		
Razem	52,9845				

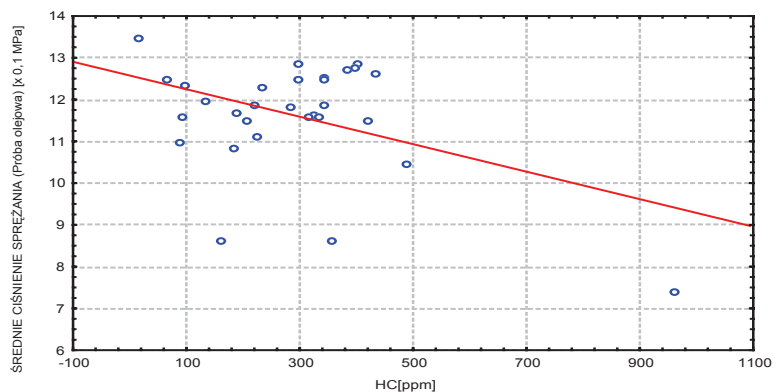
$$R^2=0,184 \quad S_e \approx 1,243$$

### Równanie regresji:

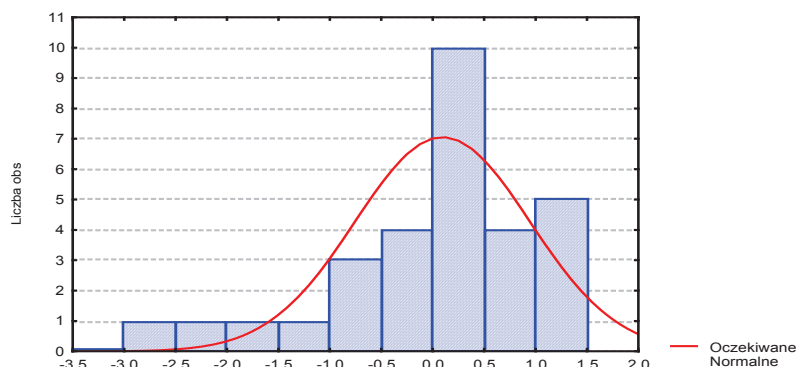
$$\text{ŚREDNIE CIŚNIENIE SPRĘŻANIA PRÓBA OLEJOWA} = 12,575 - 0,003 * \text{HC}_w \quad (3)$$

gdzie: HC<sub>w</sub> – zawartość węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego.

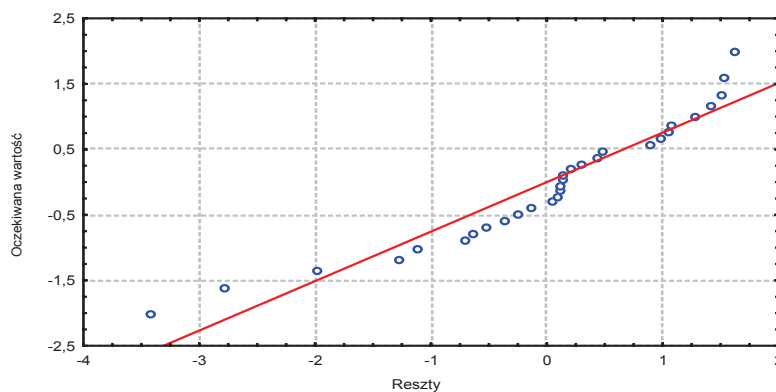
Rysunek 4 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej od zawartości węglowodorów w spalinach, rysunek 5 prezentuje rozkład reszt standaryzowanych, rysunek 6 obrazuje graficznie prawdopodobieństwo reszt.



Rys. 4. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej od zawartości węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego



Rys. 5. Rozkład reszty standaryzowanej dla analizy średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej



Rys. 6. Normalny wykres prawdopodobieństwa reszt dla analizy średniego ciśnienia sprężania w próbie olejowej

**Zmienna objaśniana: średnia szczelność**

- Wariant pierwszy - regresja względem węglowodorów HC

Tab. 5. Wyniki analizy regresji dla średniej szczelności

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(28)	Poziom p
W. wolny	89,155	2,643518	33,72589	3,23E-24
HC <sub>w</sub>	-0,01894	0,007908	-2,39475	0,023566

Tab. 6. Analiza wariancji dla średniej szczelności

	Suma kwadrat.	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	323,1534	1	323,1534	5,73482	0,023566
błąd	1577,782	28	56,34936		
Razem	1900,935				

$$R^2=0,170 \quad S_e \approx 7,507$$

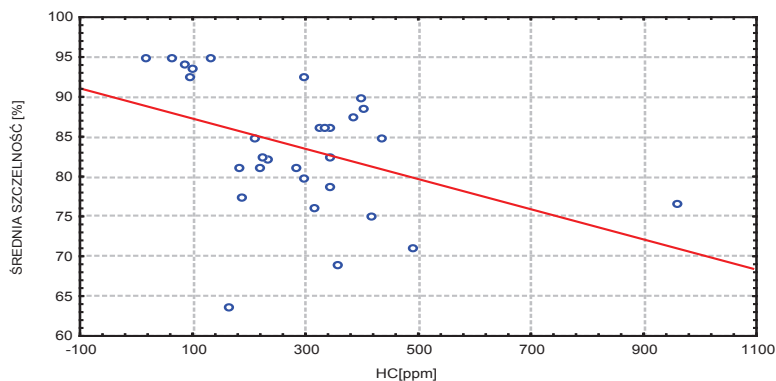
**Równanie regresji:**

$$\text{ŚREDNIA SZCZELNOŚĆ} = 89,155 - 0,019 * \text{HC}_w \quad (4)$$

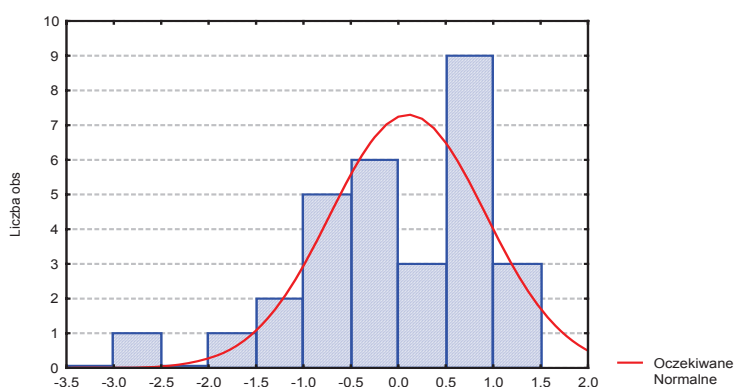
gdzie: HC<sub>w</sub> – zawartość węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

Rysunek 7 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od

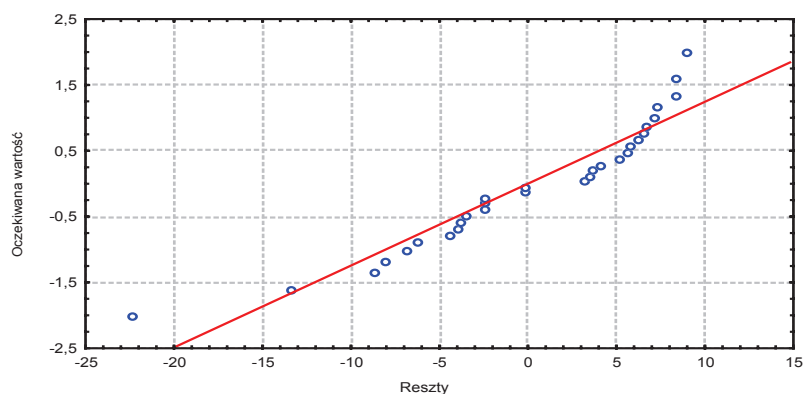
zawartości węglowodorów w spalinach, rysunek 8 prezentuje rozkład reszt standaryzowanych, rysunek 9 obrazuje graficznie prawdopodobieństwo reszt.



Rys. 7. Wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od zawartości węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego



Rys. 8. Rozkład reszty standaryzowanej dla analizy średniej szczelności



Rys.9. Normalny wykres prawdopodobieństwa reszt dla analizy średniej szczelności

- Wariant drugi regresja krokowa postępującą względem wszystkich danych z grupy II bez lambda (ostatecznie zależność od  $HC_w$  i  $O_{2w}$ )

Tab. 7. Wyniki analizy regresji dla średniej szczelności

	Współczynniki	Błąd standardowy współczynników	Wartość funkcji testowej t(27)	Poziom p
W. wolny	83,88395	2,941943	28,51311	,000000
$O_{2w}$	1,13713	,384695	2,95593	,006399
$HC_w$	-,01757	,007015	-2,50447	,018604

Tab. 8. Analiza wariancji dla średniej szczelności

	Suma kwadrat.	Stopnie swobody	Średni kwadrat	F	Poziom p
Regresja	708,908	2	354,4538	8,028548	,001836
błąd	1192,028	27	44,1492		
Razem	1900,935				

$$R^2=0,373$$

$$S_e = 6,645$$

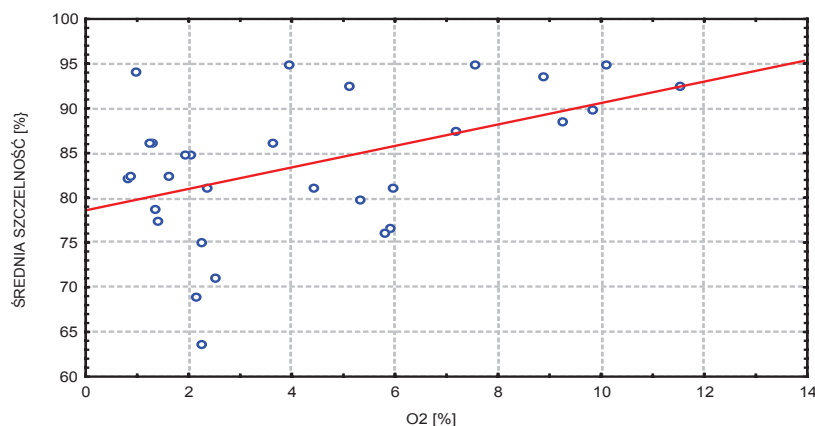
$O_{2w}$  – zawartość tlenu w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

Równanie regresji:

$$\text{ŚREDNIA SZCZELNOŚĆ} = 83,884 + 1,137 \cdot O_{2w} - 0,018 \cdot HC_w \quad (5)$$

gdzie:  $HC_w$  – zawartość węglowodorów w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

Rysunek 10 przedstawia wykres rozrzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od zawartości tlenu  $O_2$  w spalinach.



Rys.10. Wykres zrzutu przebiegu zmian zależności średniej szczelności od zawartości tlenu  $O_2$  w spalinach dla prędkości obrotowej biegu jałowego

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Kluczowym zagadnieniem w procesie eksploatacji silników jest maksymalne wykorzystanie bezinwazyjnej diagnostyki technicznej pozwalającej na poprawną ocenę stanu technicznego. Warunki współpracy podsystemu funkcjonalnego TPC decydują nie tylko o niezawodnym funkcjonowaniu silnika, lecz przede wszystkim o ekonomicznej eksploatacji i ekologii spalin.

Dotychczasowy stan wiedzy z zakresu procesów zużycia układu TPC, zużycia oleju silnikowego oraz składu spalin, nie pozwalał na jednoznaczne i szczegółowe określenie zależności pomiędzy wspomnianymi parametrami. W niniejszej pracy podjęto zatem opis tego problemu.

Wiedzę zdobytą podczas prac badawczych, analiz pomiarów i studiów literaturowych można przedstawić w postaci następujących wniosków ogólnych:

1. Skład spalin spełnia wszelkie wymagania stawiane sygnałom diagnostycznym i może być wykorzystywany do diagnozowania stanu

technicznego układu TPC stanowiąc wyjątkowo łatwo dostępny parametr diagnostyczny. Przemawia za tym fakt, że przebieg zależności parametrów stanu układu TPC od zawartości toksycznych składników w spalinach opisuje regresja liniowa, a stąd wynika, że przebieg ten jest wyraźny i liniowy, a zatem odznacza się wszelkimi cechami pozwalającymi uznać go za sygnał diagnostyczny.

- Ocena stanu technicznego silnika na podstawie analizy spalin może być wykorzystana w ramach szeroko rozumianej autodiagnostyki. Istnieją przesłanki do wykorzystania prezentowanej metody w ciągłej samoocenie stanu układu TPC, realizowanej przez układy diagnostyki pokładowej pojazdów ze względu na łatwą dostępność sygnału diagnostycznego składu spalin.
- Składnikiem spalin najlepiej opisującym zużycie układu TPC są węglowodory HC, co jest naturalną konsekwencją termicznego procesu zużycia oleju w komorze spalania. Znajdują to odzwierciedlenie w wartościach współczynników determinacji określanych przy



opisie danych doświadczalnych równaniami regresji liniowej.

4. Zawartość tlenu węgla CO w spalinach stanowi wtórny sygnał diagnostyczny opisujący stan układu TPC, gdyż zwiększony poziom CO w spalinach jest następstwem nieprawidłowości procesu spalania, których przyczyną jest zużycie układu tłokowego.
5. Przeprowadzenie badań trwałościowych silników w warunkach hamowni silnikowej przyczyniłoby się do znacznej poprawy współczynnika  $R^2$  oraz umożliwiłoby uzyskanie formuł i algorytmów do precyzyjnego prognozowania zużycia układu TPC.

Podsumowując, niniejsza praca jest fundamentem do dalszych prac badawczych. Jednocześnie został wykazany związek stanu technicznego układu TPC ze składem spalin emitowanych przez silnik spalinowy. Określone zostały także obszary wykorzystania proponowanej metody diagnostycznej.

Reasumując analizę sformułowanych wniosków potwierdzających celowość podjęcia niniejszego tematu, można sformułować następujące ogólne spostrzeżenia:

1. Skład spalin jest jednym z najlepszych sygnałów diagnostycznych możliwych do wykorzystania w ocenie stanu układu TPC, gdyż cechuje się dużą dostępnością oraz łatwością pomiaru i w sposób

prawidłowy opisuje stany diagnostyczne układu tłokowego.

2. Proponowana metoda może mieć zastosowanie w diagnostyce i autodiagnostyce w odniesieniu do silników trakcyjnych i stacjonarnych.
3. Proponowana metodyka oceny stanu układu TPC umożliwia precyzyjne łączenie parametrów ekologicznych ze stanem technicznym silnika.

#### LITERATURA:

- [1] Kornacki J., Mielniczuk J.: „Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych” Wydawnictwa Naukowo – Techniczne Warszawa 2001.
- [2] Merksiz J.: Studium wpływu zużycia oleju na emisję toksycznych związków w szybkoobrotowych silnikach spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Seria rozprawy nr 261, Poznań 1992
- [3] Piekarski W.: Analiza oddziaływania agregatów ciągnikowych na środowisko przyrodnicze, rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, Lublin 1997.
- [4] Żółtowski B., Jankowski M.: Diagnostyka '99. Materiały konferencyjne. Cz. 1 i 2 Bydgoszcz – Borówno 1999.



Prof. dr hab. inż. Wiesław Piekarski, jest Prodziekanem Wydziału Inżynierii Produkcji i Kierownikiem Katedry Energetyki i Pojazdów Akademii Rolniczej w Lublinie.



Prof. dr hab. Mirosława Wesołowska – Janczarek jest Kierownikiem Katedry Zastosowań Matematyki Akademii Rolniczej w Lublinie. Zajmuje się statystyką matematyczną, teorią eksperymentu i zastosowań metod matematycznych do analizy wyników eksperymentów.

Mgr inż. Sławomir Juściński  
Katedra Energetyki i Pojazdów  
Akademia Rolnicza w Lublinie  
ul. Głęboka 28 20 – 612 Lublin  
tel. (081) 445 61 07