

Zbigniew CHMIELEWSKI<sup>1</sup>

### OCENA ZUŻYCIA SILNIKA SPALINOWEGO O ZS Z WYKORZYSTANIEM PARAMETRÓW STANU OLEJU SILNIKOWEGO

*W artykule przedstawiono nową metodę prognozowania trwałości układu tłok-pierścienie-cylinder (TPC) silnika spalinowego w oparciu o obserwowane zmiany własności fizykochemicznych eksploataowanego oleju silnikowego. Dotychczas stosowane metody oceny trwałości skojarzenia TPC wymagały zebrania informacji o chwilach osiągnięcia stanu granicznego układu, bądź wykorzystywały modele kinetyki zużycia opracowane na podstawie badań przyspieszonych obiektów rzeczywistych. W zaproponowanej metodzie do oceny trwałości tulei cylindrowych silnika wykorzystuje się informacje pochodzące z badań eksploataowanego w silniku oleju.*

### EVALUATION OF WEAR OF DIESEL ENGIN BY USING PARAMETERS OF THE MOTOR OIL

*The paper presents a new method of forecasting the durability of piston-rings-cylinder (PRC) liner assembly of the internal combustion engine on the basis of observed changes of physical and chemical properties of engine oil. Methods used so far for the durability evaluation of the PRC group required collecting information about the moments when the assembly reached its boundary state or used kinetic models of wear designed using accelerated research of real objects. In the proposed method, for the evaluation of durability of engine cylinders information gathered from engine oil is used.*

#### 1. WSTĘP

Systemy diagnostyczne, wykorzystywane we współczesnych silnikach spalinowych, mają na celu lokalizację elementu lub układu, który wskutek naturalnego zużycia lub uszkodzenia nie może dalej pełnić swojej funkcji. Rosnące wymagania, dotyczące trwałości i niezawodności silników spalinowych oraz minimalizacji kosztów i niekorzystnego oddziaływania na otoczenie, powodują konieczność pozyskiwania informacji o ich stanie podczas eksploatacji [8, 9, 10].

Jednym z kierunków poszukiwań informacji diagnostycznej jest monitorowanie poziomu drgań generowanych przez podzespoły silnika. Silnik spalinowy jest obiektem podlegającym oddziaływaniu wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych. Należą do nich

---

<sup>1</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.  
tel: + 48 48 361-76-68, e-mail: zbigniew.chmielewski@pr.radom.pl

przede wszystkim: ciśnienie spalania, ruch układu tłokowo-korbowego, wymuszenia ze strony układu rozrządu, wymuszenia wynikające z pracy osprzętu silnika.

Jednym z głównych wymuszeń, występujących w trakcie pracy układu tłokowo-korbowego, są uderzenia tłoka przy zmianie jego kierunku ruchu. Wartość wymuszenia zależy w istotny sposób od luzu pomiędzy tłokiem a ścianką cylindra, spowodowanym zużyciem eksploatacyjnym silnika.

Zarejestrowany na kadłubie silnika sygnał drganiowy nie daje jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o aktualny stan techniczny skojarzenia tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (TPC), tj. wartość luzu w tym skojarzeniu [10].

Zdaniem autora celowym wydaje się podjęcie badań w kierunku wykorzystania oleju silnikowego, a w zasadzie zmian fizykochemicznych w nim zachodzących w czasie eksploatacji, jako źródła sygnału diagnostycznego. Wyniki wstępnych badań, dotyczących przydatności analizy fizykochemicznej eksploatowanego w silniku oleju do oceny zużycia układu TPC zaprezentowano w pracy [3]. Pozytywne wyniki przeprowadzonej analizy korelacji zmian wybranych wskaźników stanu oleju z przebiegiem pojazdu, skłoniły autora do podjęcia badań w kierunku wykorzystania sygnału diagnostycznego, w postaci zmierzonej wartości wybranego wskaźnika oceny stanu eksploatowanego oleju silnikowego, do oceny zużycia tulei cylindrowych silnika. Wyniki tych badań przedstawiono w niniejszej pracy.

## 2. OPIS METODY

Stosowane dotychczas metody oceny trwałości skojarzenia TPC wymagają prowadzenia badań aż do chwili osiągnięcia stanu granicznego obiektu (metody a'posteriori) [2], bądź też wymagają ingerencji w układ tribologiczny celem oszacowania rezerwy prawidłowej pracy obiektu np.: mikrometraż, metoda sztucznych baz, metody izotopowe [1]. Nowe metody, np. rejestracja sygnału drganiowego, nie pozwalają na jednoznaczną ocenę zużycia. Przedstawiona poniżej nowa metoda eliminuje te wady.

Do oceny trwałości tulei cylindrowych silnika wykorzystuje bowiem informacje pochodzące z badań eksploatowanego w silniku oleju. Spełnia on ważne funkcje tworząc z silnikiem system tribologiczny. Zmiany własności fizykochemicznych oleju wynikają z oddziaływania systemu i wiążą się nierozdzielnie z jego stanem technicznym tj. zużyciem tulei cylindrowych. Spośród elementów systemu tribologicznego TPC olej silnikowy podlega najszybszym zmianom na poziomie makroskopowym, a jego wybrane wskaźniki fizykochemiczne spełniają wymogi sygnału diagnostycznego. Prezentowana metoda oceny trwałości tulei cylindrowych silnika w swych założeniach przeznaczona jest do wykorzystania przez szerokie grono użytkowników nie dysponujących bogatym zapleczem technicznym i diagnostycznym. Wykorzystuje zatem okresową wymianę oleju w silniku, prowadzoną w ramach obsługi technicznych, do zebrania informacji o:

- 1) parametrach oleju świeżego,
- 2) parametrach oleju przepracowanego,
- 3) czasu eksploatacji oleju w silniku.

Na podstawie tych danych można określić wartość wskaźnika intensywności zmian własności oleju  $C_w(1)$ :

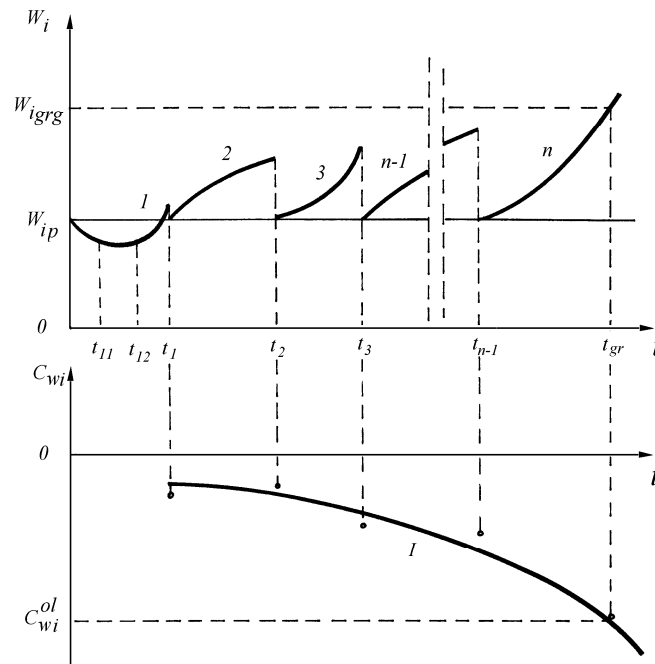
$$C_w = \frac{W_p - W_k}{t_{ol}} \text{ dla } t > 0 \quad (1)$$

gdzie:  $W_p$  – wartość mierzonego wskaźnika oceny stanu oleju dla oleju świeżego  
 $W_k$  – wartość mierzonego wskaźnika oceny stanu oleju dla oleju przepracowanego (w chwili wymiany),  
 $t_{ol}$  – czas pracy oleju w silniku do wymiany,  
 $C_w$  – wskaźnik intensywności zmian własności oleju.

Wskaźnik ten niesie ze sobą uśrednioną informację na temat intensywności oddziaływania silnika na olej. Nie uwzględnia okresowych zmian wartości mierzonego parametru oleju, lecz odzwierciedla długotrwałą tendencję obserwowanych zmian. Okresowe zmiany kontrolowanego wskaźnika mogą wynikać m.in. z faktu stosowania dolewek na skutek ubytków oleju (wycieki, spalanie). Szczegółowa analiza zmian wartości wskaźnika w takim przypadku wprowadzałaby zafałszowania w uzyskiwanej informacji diagnostycznej. Długotrwała obserwacja wartości wskaźnika oceny stanu oleju i zaobserwowane w ten sposób jego zmiany pozwalają sądzić, że przyczyną takich zmian są procesy zużyciowe zachodzące w silniku. Graficzną interpretację tych zjawisk przedstawiono na rys.1.

Krzywe 1, 2, 3, ...,  $n$  obrazują zmiany obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju  $W_{ol}$  w czasie między wymianami  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  oleju. Szczegółowa analiza chwilowych wartości wskaźnika dla czasów  $t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}, \dots, t_{n1}$  i wyliczone na tej podstawie chwilowe wartości wskaźnika intensywności zmian własności oleju  $C_{wch}$  nie niosą ze sobą ważnych informacji diagnostycznych w aspekcie stanu technicznego – zużycia silnika. Są bowiem wynikiem oddziaływania wymuszeń chwilowych bądź krótkotrwałych na silnik (zwiększenie obciążenia, przeprowadzona obsługa techniczna, itp.) lub bezpośrednio na olej (dolewka świeżej porcji, zanieczyszczenia z zewnątrz na skutek uszkodzenia filtra, itp.). Jednak analiza zmian własności w dłuższym cyklu badawczym (tj. od wymiany do wymiany oleju) pozwala zaobserwować długotrwałą tendencję zmian – krzywa I. Wartości wskaźników  $C_{w1}, C_{w2}, C_{w3}, \dots, C_{wn}$  wykazują tendencję malejącą (wynikającą ze wzrostu wartości końcowej obserwowanej własności oleju względem jej wartości początkowej  $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn} > W_p$ ) co wskazuje na intensyfikację zmian zobrazowanej własności oleju wraz z przebiegiem silnika. Tego typu zmiany mogą być tylko wynikiem zużycia układu TPC i wynikającego stąd większego oddziaływania silnika na olej. Konsekwencją tego jest szybsza zmiana jego własności fizycznych i chemicznych odzwierciedlona w zmianie wartości wskaźnika  $C_w$ . Na rys. 1. oznaczono też chwilę osiągnięcia granicznej wartości obserwowanego wskaźnika. Stanowi ona punkt przecięcia krzywej I z wartością odpowiadającą dolnej dopuszczalnej wartości wskaźnika intensywności zmian własności oleju  $C_w$ . W tym przypadku wartość ta związana jest z osiągnięciem górnej dopuszczalnej wartości obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju  $W$  – wartość wynikająca z przyjętych kryteriów stanu granicznego. W sytuacji gdy wartość obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju maleje ( $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn} < W_p$ ) osiągnięcie stanu granicznego wynikać będzie z przekroczenia górnej wartości granicznej wskaźnika  $C_w$  związanej z dolną dopuszczalną wartością dla obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju  $W$ .

Na rysunku 1 przedstawiono hipotetyczną realizację (zmiany wartości wskaźnika oceny własności oleju) odnoszącą się do pojedynczego eksploatowanego obiektu (silnika).



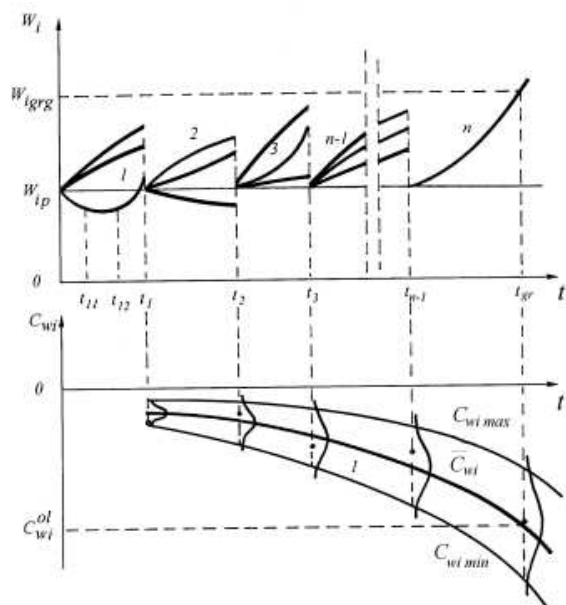
Rys.1. Graficzna interpretacja zmian wskaźnika oceny stanu oleju w czasie

$W_p$  – początkowa wartość wskaźnika stanu oleju,  $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}$  – końcowa wartość wskaźnika stanu oleju w chwili 1, 2, ..., n wymiany oleju,  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – chwile wymiany oleju w silniku,  $C_w$  – wskaźnik intensywności zmian własności

W rzeczywistości dla każdego indywidualnego obiektu z badanej próby z populacji otrzymuje się wyniki rozproszone. Stąd zależność opisująca zmienność wskaźnika intensywności zmian własności w populacji może być tylko zależnością stochastyczną – korelacyjną.

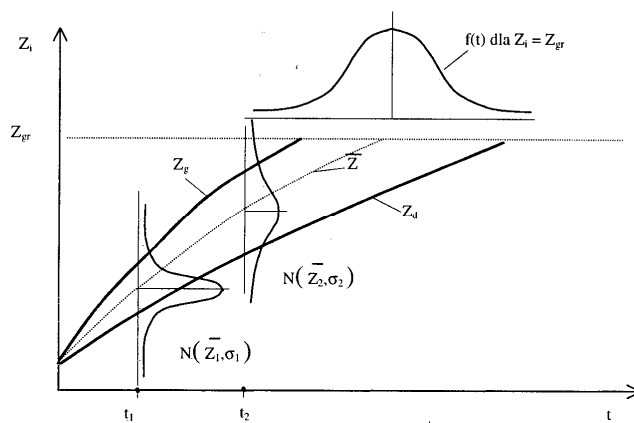
Obszar rozproszenia ograniczają funkcje regresji  $C_{wi\ max}$  i  $C_{wi\ min}$  odpowiadające górnej i dolnej granicy przedziału ufności. Konkretnie wartości zależą od arbitralnego przyjęcia poziomów ufności (dla celów technicznych 0,9; 0,95; 0,99) – rysunek 2.

Przedstawione na rysunkach 1 i 2 zmiany zachodzące w oleju silnikowym następują równoległe z procesem zużywania tulei cylindrowych silnika. Matematyczny opis tego procesu tworzą trzy krzywe odzwierciedlające wartość oczekiwaną zmian  $z$  (wyznaczoną na podstawie badań eksploatacyjnych), górną granicę realizacji procesu losowego zużycia  $z_g$  oraz dolną granicę przebiegu procesu zużycia  $z_d$ . Te trzy równania łącznie tworzą statystyczny model procesu zużycia tulei cylindrowych (rys.3).



Rys.2. Graficzna interpretacja zmian wskaźnika oceny stanu oleju w czasie dla populacji obiektów

$W_p$  – początkowa wartość wskaźnika stanu oleju,  $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}$  – końcowa wartość wskaźnika stanu oleju w chwili 1, 2, ..., n wymiany oleju,  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – chwile wymiany oleju w silniku,  $C_w$  – wskaźnik intensywności zmian własności



Rys.3. Graficzna interpretacja matematycznego modelu procesu zużycia tulei cylindrycznych

Taki opis procesu zużycia pozwala dla dowolnej chwili czasu  $t$  określić szerokość przedziału ufności na poziomie ufności  $\beta$ , w którym znajdują się rzeczywiste realizacje procesu losowego. Wybór poziomu ufności jest zagadnieniem decyzyjnym. Granice przedziału ufności dla wyników odnoszących się do czasu prowadzenia obserwacji  $t_1$  można zapisać w postaci:

$$z_1^s = \bar{z}_1 + q_\beta \cdot \sigma_1 \quad (2a)$$

$$z_1^d = \bar{z}_1 - q_\beta \cdot \sigma_1 \quad (2b)$$

gdzie:  $q_\beta$  – współczynnik proporcjonalności.

Wartość współczynnika  $q_\beta$  należy ustalić (w zależności od liczności rozpatrywanej próby wyników) zgodnie z zasadami budowy estymatorów przedziałowych.

Wykorzystanie oleju silnikowego jako źródła informacji do prognozowania trwałości silnika jest możliwe jedynie wtedy, gdy wykaże się, że kinetyka zmian wybranych własności fizykochemicznych eksploatowanego oleju silnikowego odzwierciedla zmiany zużyciowe występujące w obserwowanej parze kinematycznej TPC. Potwierdzeniem takiej korelacji jest m.in. uzyskanie porównywalnych wartości szacowanej trwałości tulei cylindrowych silnika z wykorzystaniem metody zużyciowej jak i „olejowej”. W tym celu należy przeprowadzić badania eksploatacyjne, celem wyznaczenia przebiegu krzywych  $I$  (rys.2) oraz  $\bar{z}$  (rys.3).

### 3. BADANIA EKSPLOATACYJNE

Weryfikacji metody dokonano na populacji 5-ciu silników 359M eksploatowanych w samochodach STAR 1142. Są to silniki o zapłonie samoczynnym, wtrysku bezpośrednim, rzędowym układzie cylindrów i mocy 110 [kW]. Samochody użytkowane były przez Zakład Transportu Samochodowego Poczty Polskiej w Lublinie. Przebiegi dzienne samochodów wynosiły od 240 do 350 [km]. Samochody eksploatowano w warunkach jazdy miejskiej i na trasach pozamiejskich. Wszystkie obsługi techniczne wykonywane były zgodnie z zaleceniami producenta.

Dla wyznaczenia przebiegu krzywej  $\bar{z}$  w eksploatowanych silnikach wykonywano okresowo mikrometrąz tulei cylindrowych zgodnie z zaleceniami Normy Branżowej [4]. Dodatkowo w trakcie wykonywania okresowych obsług technicznych połączonych z wymianą oleju w silniku pobierano próbki oleju poddając je analizie fizykochemicznej. Oznaczano podstawowe wskaźniki fizykochemiczne i funkcjonalne oleju przepracowanego. Analiza przeprowadzana była w Centralnym Laboratorium Naftowym w Warszawie. Podobnej analizie poddano olej świeży eksploatowany w silnikach. W całym okresie prowadzonych badań we wszystkich silnikach używano tego samego oleju silnikowego tj. JASOL 9 produkowanego przez Podkarpackie Zakłady Rafineryjne w Jaśle. Zebrane informacje posłużyły do wyznaczenia przebiegu krzywej  $I$  (rys.2). Szczegółowe informacje dotyczące metodyki, warunków oraz zakresu badań zawiera praca [5].

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie zebranych informacji wyznaczono równania wartości oczekiwanej oraz dolnej i górnej granicy realizacji procesu zużycia. Pełny matematyczny opis procesu zużycia tulei cylindrowych dla okresu eksploatacji  $t > t_d$  ( $t_d$  – okres docierania) przedstawia układ równań (3):

$$\bar{z} = (0,000132) \cdot t + 43,961 \quad [\mu\text{m}] \quad (3a)$$

$$z_d = \min\{(0,000105) \cdot t + 43,961, (0,000132) \cdot t + 38,466\} \quad [\mu\text{m}] \quad (3b)$$

$$z_g = \max\{(0,000159) \cdot t + 43,961, (0,000132) \cdot t + 49,456\} \quad [\mu\text{m}] \quad (3c)$$

gdzie:  $t$  – czas pracy silnika (przebieg) [km].

Podobnej analizie poddano wyniki badań oleju przepracowanego. Stwierdzono [5], na podstawie analizy teoretycznej jak też analizy statystycznej wyników badań, że najlepszym wskaźnikiem oceny zmian własności oleju jest lepkość kinematyczna w temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$  i odpowiadający jej wskaźnik intensywności zmian lepkości kinematycznej w temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$  –  $C_{V100}$  (wzór (1)). Przebieg zmian wskaźnika  $C_{V100}$  względem czasu eksploatacji przedstawia zależność (4):

$$C_{v100} = (3,277) - (2,142) \cdot t^{(0,033)} \left[ \frac{\text{mm}^2}{\text{s} \cdot \text{km}} \right] \quad (4)$$

gdzie:  $t$  – czas pracy silnika (przebieg) [km].

Tab. 1. Zestawienie prognoz trwałości tulei cylindrowych silnika 359M

L.p.	Źródło danych	Kryterium	Parametr stanu granicznego		Trwałość $\times 10^3$ [km]		
			Opis parametru	Wartość graniczna	$T_{min}$	$T_{sr}$	$T_{max}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1.	własne	techniczne	zużycie $\bar{z}$ tulei cylindrowej na głębokościach 20, 35, 50, 95 [mm] w płaszczyźnie A-A i B-B	126 [ $\mu\text{m}$ ]	516,0	621,5	781,3
2.	własne	olejowe	wskaźnik intensywności zmian lepkości kinematycznej oleju silnikowego w temperaturze $100^{\circ}\text{C}$ – $C_{V100}$	-0,066 [ $\text{mm}^2/\text{s km}$ ]	---	630,2	---

Na podstawie zależności (3) i (4) oszacowano trwałość skojarzenia TPC silnika 359M. W przypadku kryterium technicznego trwałość układu wynika z osiągnięcia dopuszczalnej wartości zużycia tulei cylindrowej. Wartość tę przyjęto na podstawie pracy [6]. W przypadku kryterium „olejowego” wartości graniczne lepkości kinematycznej  $V_{100}$  przyjęto na podstawie normy BN-77/0535-46 [7]. Na tej podstawie wyliczono graniczną wartość wskaźnika  $C_{V100gr}$ , która posłużyła do wyznaczenia trwałości tulei cylindrowych silnika w oparciu o kryterium olejowe. Wyniki obliczeń zawiera tabela 1.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione kryterium olejowe uwzględnia możliwość prawidłowej oceny współpracy elementów złożenia TPC, ze względu na rodzaj występującego tarcia. Warunkiem występowania tarcia płynnego jest m.in. zachowanie odpowiedniej szczeliny między trącymi elementami w stosunku do lepkości stosowanego środka smarowego. Wzrost luzu między elementami układu TPC powoduje intensyfikację procesów degradacji zachodzących w oleju, a tym samym szybszą zmianę jego lepkości. Zaproponowana metoda prognozowania trwałości tribologicznej z wykorzystaniem wyników bieżącej (w sensie kinetycznym) oceny zmian własności oleju daje porównywalne (zgodne) wyniki co do trwałości średniej oszacowanej według założeń metody prognostycznej, związanej z kryterium technicznym (opartym na ocenie intensywności zużycia). Średnie wartości trwałości prognozowanej wynoszą  $621,5 \cdot 10^3$  km przy wykorzystaniu kryterium technicznego i  $630,2 \cdot 10^3$  km dla przypadku stosowania kryterium olejowego. Zatem opierając się na informacjach opisujących stan eksploatowanego środka smarowego, można bez konieczności ingerencji w monitorowany układ tłok-pierścienie-cylinder, za pomocą nieskomplikowanych metod pomiarowych prowadzonych poza obiektem technicznym, bez wyłączania go z eksploatacji, (na przyjętym poziomie ufności) dokonać oceny trwałości tulei cylindrowych eksploatowanego silnika.

Opracowana metoda ma charakter uniwersalny i może być wykorzystywana do oceny trwałości tribologicznej tulei cylindrowych, eksploatowanych silników spalinowych z zapłonem samoczynnym. Wymaga jedynie wyznaczenia przebiegu krzywej opisującej zmiany wskaźnika intensywności lepkości kinematycznej w  $100^{\circ}\text{C}$  –  $C_{V100}$  eksploatowanego oleju (4) i prawidłowego wyboru granicznej wartości tego wskaźnika, stosownie do klasy jakościowej i lepkościowej oleju.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Zhou Y., Ma L., Mathew J., Sun Y., Wolff R.: *Prognozowanie trwałości środków technicznych z wykorzystaniem wielu wskaźników degradacji i zdarzeń awaryjnych w ujęciu modelu ciągłej przestrzeni stanów*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 4(44)/2009, s 72-81.
- [2] Nadolny K.: *Modele kinetyczne procesu zużywania*. W: Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn pod red. W. Zwierzyckiego, PWN, Warszawa – Poznań 1990.
- [3] Chmielewski Z.: *Badania oleju silnikowego jako źródła informacji o stanie technicznym silnika spalinowego o ZS*. Logistyka nr 2/2010, Logistyka – nauka, s. 142.



- [4] Norma BN-79/1374-04. *Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Badania niezawodności.*
- [5] Chmielewski Z.: *Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji.* Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2001.
- [6] Niewczas A., Chmielewski R., Chmielewski Z., Wronka G.: *Analiza przebiegów do naprawy głównej oraz zużycia granicznego tulei cylindrowych samochodów STAR 200.* Raport wykonany dla ZS STAR S.A.
- [7] Norma BN-77/0536-46. *Ocena stopnia przepracowania olejów do silników z zapłonem samoczynnym.*
- [8] Dąbrowski Z., Madej H.: *Masking mechanical damages in the modern control systems of combustion engines.* J. of KONES, 2006, 13, 3.
- [9] Isermann R.: *Diagnosis methods for electronic controlled vehicles.* Vehicle Systems Dynamics, 36, 2-3.
- [10] Czech P., Madej H.: *Wykrywanie luzu w układzie tłok-cylinder przy wykorzystaniu analizy EMD.* Problemy Eksploatacji nr 4/2008, s. 65-71.