

Wielokryterialna ocena trwałości silnika spalinowego o ZS

trwałość silnika, prognozowanie,
badania eksploatacyjne

Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę trwałości silnika o zapłonie samoczynnym z wykorzystaniem kryteriów: technicznego, ekonomicznego oraz olejowego. Dokonano oceny przeprowadzonej prognozy pod kątem wiarygodności i wskazano optymalną metodę prognozy trwałości silnika o ZS.

MULTICRITERIAL ASSESSMENT OF THE DURABILITY OF DIESEL ENGINE

Abstract

This paper presents an assessment of durability of diesel engines using the following criteria: technical, economic and oil. An evaluation of the applied prediction in terms of reliability was carried out and optimal method of diesel engine durability prediction was indicated.

1. WSTĘP

W teorii eksploatacji maszyn trwałość definiuje się jako zdolność do zachowania stanu zdatności maszyn w określonych warunkach eksploatacji. Stan zdatności jest to taki stan obiektu, który gwarantuje pełną realizację zadanych funkcji użytkowych obiektu. Podana definicja określa trwałość w sensie opisowym, natomiast w sensie ilościowym (normatywnym) trwałość obiektu jest to uogólniony czas eksploatacji (liczony od chwili wyprodukowania), w którym obiekt zachowuje wybrane cechy w określonych granicach [1]. O wyborze tych cech, a w konsekwencji o ich granicznych wartościach, decydują przyjęte kryteria oceny trwałości. Mówi się także, że trwałość w sensie ilościowym jest uogólnionym czasem pracy do chwili osiągnięcia przez obiekt stanu granicznego.

Z przedstawionych definicji wynika, że w zagadnieniach trwałości obiektów technicznych, w tym silników spalinowych, istnieją dwie główne grupy problemów:

- dobór wskaźników trwałości obiektu,
- kryteria oceny granicznego stanu obiektu.

W odniesieniu do pierwszej grupy w literaturze przedmiotu wyróżnia się niekiedy dwie grupy wskaźników trwałości samochodów i ich elementów [2]:

- kontrolne – stosowane w badaniach stanowiskowych lub doświadczalnych badaniach modelowych,
- eksploatacyjne.

Do pierwszej grupy zalicza się liczbę godzin pracy lub ilość wykonanej pracy w umownych warunkach badań do chwili osiągnięcia przez obiekt granicznego zużycia lub uszkodzenia.

Do drugiej grupy wskaźników zalicza się czas pracy w godzinach, przebieg w kilometrach oraz ilość wykonanej pracy do uszkodzenia w normalnych warunkach eksploatacji.

Niniejszy artykuł odnosi się do drugiej grupy wskaźników.

2. KONCEPCJA OCENY TRWAŁOŚCI SILNIKA

W praktycznych zastosowaniach inżynierii niezawodności ważne znaczenie mają ustalone parametry przewidywanego rozkładu trwałości (czasu poprawnej pracy):

- trwałość $T_{P=0,5}$ zwana trwałością średnią T_{sr} ,
- trwałość zwana trwałością gwarantowaną T_{gw} ,
- trwałość modalna T_m .

Przez trwałość średnią rozumie się taką trwałość, która zostanie osiągnięta z prawdopodobieństwem $P = 0,5$. Oznacza to, że połowa (50%) obiektów rozpatrywanej populacji osiągnie trwałość większą niż T_{sr} .

Trwałość gwarantowana oznacza, że 90% obiektów badanej populacji osiągnie trwałość większą niż T_{gw} . Wartość T_{gw} powinien podać wytwórca obiektu, gwarantując jej osiągnięcie pod warunkiem przestrzegania określonych zasad eksploatacji.

Trwałość modalna (dominanta) oznacza wartość trwałości występującą najczęściej w danej populacji obiektów.

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn; 26-600 Radom, ul. Chrobrego 45.
tel: + 48 48 361-76-68, e-mail: zbigniew.chmielewski@pr.radom.pl

Takie ujęcie zagadnienia ma charakter populacyjny i wynika z konieczności uwzględnienia charakteru stochastycznego eksploatacji obiektów technicznych (tu silników spalinowych zainstalowanych w różnych pojazdach mechanicznych).

Drugą grupę problemów stanowi określenie kryteriów oceny granicznego stanu obiektu.

Zagadnienia stanów granicznych są często dyskutowane w piśmiennictwie specjalistycznym z dziedziny niezawodności [3, 4, 5]. Punktem wyjścia do rozważań nad stanami granicznymi może być prawo przechodzenia zmian ilościowych w jakościowe, które głosi, że zmiany ilościowe po osiągnięciu pewnego stopnia nasilania prowadzą do zmian jakościowych poprzez pewnego rodzaju skok czy też przerwanie ciągłości. Nieciągłość, jako gruntowna zmiana jakości, zachodzi na swego rodzaju linii demarkacyjnej, która jest miarą, oddzielającą jedną jakość od drugiej. Miary pojawiają się nie tylko w zjawiskach i procesach zachodzących w otaczającej nas przyrodzie, ale również dotyczą ludzkiego myślenia, wartościowania i ocen [6].

Autorzy pracy [4] sformułowali następującą definicję stanów granicznych: „Stan graniczny obiektu technicznego to stan, w którym decydent na podstawie przyjętej miary uznaje, że zostaje przerwana ciągłość zmian ilościowych istotnych cech badanego systemu obiekt-otoczenie, tzn., że zmiany ilościowe przechodzą w zmiany jakościowe (niekorzystne z punktu widzenia decydenta) i w związku z tym podejmuje decyzję o dalszych losach obiektu”.

Z przedstawionej definicji stanów granicznych wynika, że w wielu przypadkach ustalone miary nie są wartościami stałymi.

W Polskiej Normie [7] zdefiniowano stan graniczny obiektu jako taki stan fizyczny (techniczny), w którym dalsza eksploatacja obiektu jest niemożliwa lub niewskazana.

Kryteria stanu granicznego są uzależnione od przyjętych parametrów jakości stanu technicznego silnika. Uwzględniając, że jakość wyrobów wymiaruje się stopniem spełnienia wymagań nabywcy (stopniem zadowolenia nabywcy), należy stwierdzić, że najważniejszymi kryteriami stanu granicznego silnika samochodowego powinny być kryteria postulowane przez użytkownika tj. [1]:

- kryteria techniczne,
- kryteria ekonomiczne.

Odpowiadają one parametrom technicznym X_{tech} parametrom ekonomicznym X_{ekon} , opisującym stany techniczne silnika.

Kryteriami technicznymi stanu granicznego silnika są wymagania wg danych nominalnych ustalonych przez producenta lub wg normatywnych warunków technicznych dopuszczenia pojazdów do ruchu. W szczególności są to:

- maksymalna moc silnika przy zadanej prędkości obrotowej,
- maksymalny moment obrotowy przy zadanej prędkości obrotowej,
- minimalne jednostkowe zużycie paliwa,
- zużycie oleju smarującego,
- czas uruchomienia silnika przy zadanej temperaturze otoczenia,
- zawartość toksycznych składników w spalinach.

Kryteriami ekonomicznymi są:

- wzrost kosztów eksploatacji wynikający ze zwiększonego zużycie paliwa i oleju oraz ze zwiększonej awaryjności,
- kryterium ekonomicznej efektywności eksploatacji.

Cechą znaną każdego uszkodzenia zużyciowego, czyli zjawiska rzeczywistej lub umownej utraty zdolności przez elementy silnika na skutek rozwoju procesów zużywania, jest to, że prawdopodobieństwo jego pojawienia się wzrasta wraz z czasem pracy obiektu. Uszkodzenia zużyciowe można oceniać wg zewnętrznych skutków zużywania, tzn. na podstawie widocznych deformacji obiektu, ubytku materiału czy mierzalnych zmian własności użytkowych, albo też na podstawie porównania rozpatrywanej wartości zużycia z wartościami uznanymi wcześniej za maksymalne (dopuszczalne) [1].

Wszystkie ważne elementy konstrukcyjne (pary kinematyczne) w silniku powinny mieć określoną dopuszczalną wartość zużycia lub dopuszczalną wartość luzu. Są to wartości, po przekroczeniu których elementy konstrukcyjne należy wycofać z eksploatacji. Kryterium uznania zużycia elementu konstrukcyjnego za dopuszczalne może wynikać z wymagań [1]:

1. tribologicznych – utrzymania warunków normalnego procesu zużywania (wymagania te odnoszą się bezpośrednio do par kinematycznych),
2. technicznych szczegółowych – pełnej realizacji zadanych funkcji przez zespół silnika, np. utrzymania szczelności przestrzeni nadłokowej przez zespół TPC,
3. technicznych ogólnych – zdolności pełnej realizacji zadanych funkcji przez silnik jako całość,
4. ekonomicznych – zdolności zrealizowania zadań przez silnik lub cały samochód wg miar finansowych.

Najistotniejszym elementem w silniku spalinowym, ze względu na jego trwałość, jest układ tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (TPC) [1]. Rozpatrując zagadnienie trwałości silnika należy uwzględnić trwałość tego skojarzenia i przyjęte kryteria oraz dopuszczalne wartości dla danego kryterium odnieść do tego skojarzenia. Stąd poniżej przedstawiono metodykę określania wartości granicznej wybranego parametru stanu dla kryterium technicznego, ekonomicznego i olejowego.

Metody wyznaczania dopuszczalnych wartości zużycia elementów zespołu TPC według kryteriów technicznych mają najczęściej charakter empiryczny. Metody te są oparte na jednolitej zasadzie – za dopuszczalne zużycie elementu uznaje się taką wartość zużycia, która odpowiada chwili osiągnięcia stanu granicznego przez zespół TPC lub silnik. Zatem dopuszczalna wartość zużycia elementu $z_{(m)}$ wynosi:

$$z_{(m)} = z(t_m) \quad (1)$$

gdzie: t_m – chwila osiągnięcia stanu granicznego przez silnik ze względów technicznych,
 $z_{(m)}$ – dopuszczalna wartość zużycia elementu

Wartość $z_{(m)}$ wyznacza się na podstawie pomiarów zużycia wykonanych w chwili t_m lub na podstawie obliczeń zużycia przewidywanego w chwili t_m , jeżeli wcześniej znany jest model przebiegu zużycia oraz określono empirycznie wartości parametrów tego modelu, np. zużycie początkowe z_0 i intensywność zużywania v .

W literaturze [8, 9, 10] można znaleźć przybliżone zależności empiryczne służące do określania dopuszczalnego zużycia tulei cylindrowych. Odnoszą się one do miary zużycia zdefiniowanej wzorem:

$$z^{(1)}(t) = \max_{\varphi \in [0, \pi]} \{d(\varphi, t) - d_{nom}\} \quad (2)$$

gdzie: φ – kąt między osią wału korbowego silnika i kierunkiem pomiaru,

$z^{(1)}(t)$ – maksymalne odchylenie wartości średnicy w chwili t od wartości nominalnej,

$d(\varphi, t)$ – wewnętrzna średnica tulei cylindrowej na wysokości progu ogniowego, mierzona w kierunku określonym kątem φ w chwili t .

Funkcje określające wartości dopuszczalne zużycia tulei cylindrowej na progu ogniowym $z_{(m)}$ w sensie miary (2) nie zależą od czasu eksploatacji i mają ogólną postać:

$$z_{(m)} = \alpha \cdot d_{nom} \quad (3)$$

gdzie: α – bezwymiarowy współczynnik proporcjonalności.

Zasada ustalania dopuszczalnego zużycia elementu według kryterium ekonomicznego polega na tym, że za dopuszczalne uznaje się takie zużycie, które odpowiada chwili osiągnięcia przez silnik stanu granicznego uwarunkowanego ekonomicznie. Zasadę tę opisuje zależność (4).

$$z_{(m)} = z(t_{ekon}) \quad (4)$$

gdzie: t_{ekon} – okres ekonomiczny użytkowania silnika.

W przypadku olejów smarowych istnieją trzy zasadnicze możliwości wyboru wartości granicznych. Ocenę stanu granicznego można przeprowadzić na podstawie:

1. wytycznych normatywnych dotyczących różnych rodzajów, grup klasyfikacyjnych olejów,
2. wartości dopuszczalnych zmian niektórych parametrów oleju wynikających z obliczeń węzłów tarcowych z uwzględnieniem różnych teorii smarowania,
3. analizy kinetyki zmian własności.

Wytyczne normatywne mają charakter ogólny odnoszą się do grup, klas olejów stosowanych do smarowania silników (przede wszystkim wysokoprężnych). Nie uwzględniają one specyfiki konstrukcji obiektów, w których olej ma być użytkowany. Z drugiej strony wiadomo, jak zróżnicowanymi konstrukcjami, pod względem wysilenia, sposobów smarowania itp., mogą być silniki zaliczane np. do jednej rodziny silników wysokoprężnych. Stąd tego rodzaju wytyczne należy traktować jako orientacyjne.

Natomiast, jeśli jest to tylko możliwe, należy próbować wartości graniczne indywidualizować w zależności od specyfiki urządzenia, w którym olej jest użytkowany. Takie możliwości stwarzają różne metody obliczeniowe oparte na teoriach smarowania. Metody te jednak pozwalają takie obliczenia prowadzić tylko dla wybranych, konkretnych węzłów tarcia i dotyczą w zasadzie tylko jednej cechy oleju, a mianowicie lepkości. Najbardziej wiarygodne wartości stanów granicznych można uzyskać na podstawie analizy kinetyki zmian własności. Analizowane tendencje są efektem wpływu zarówno samego systemu tribologicznego na olej, jak i odzwierciedlają wpływ warunków eksploatacyjnych. Obecnie metoda ta jest coraz szerzej stosowana.

3. OCENA TRWAŁOŚCI SILNIKA O ZS

3.1 Obiekt badań

Obiektem badań eksploatacyjnych były silniki typu 359M zamontowane w samochodach ciężarowych STAR 1142. Badania prowadzone były na 5-ciu silnikach 359M o znanym stanie początkowym (przeprowadzono pomiary mikrometryczne wybranych elementów silnika, a w szczególności układu TPC). Silniki po dotarciu technologicznym zamontowano w samochodach STAR 1142 eksploatowanych przez Zakład Transportu Samochodowego Poczty Polskiej w Lublinie. Średnie obciążenie skrzyni ładunkowej wynosiło 5 000 [kg] i nigdy nie przekraczało dopuszczalnej

ładowności pojazdu. Przebiegi dzienne samochodów wynosiły od 240 do 350 [km]. Samochody eksploatowano w warunkach jazdy miejskiej i na trasach pozamiejskich.

W ramach bieżącej kontroli nad przebiegiem procesu eksploatacji wykonywano następujące pomiary diagnostyczne:

- pomiar ciśnienia sprężania w cylindrach,
- pomiar spadku ciśnienia (szczelności przestrzeni roboczej cylindra),
- pomiar natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej silnika,
- pomiar zadymienia spalin,
- pomiar mocy na kołach,
- pomiar oporów przepływu na filtrze powietrza,
- oznaczenie zawartości żelaza w oleju silnikowym.

3.2. Metodyka oceny

Przedstawione powyżej różne kryteria i metody wyznaczania stanu granicznego obiektu technicznego powodują uzyskiwanie różnych wyników przedstawianych prognoz. Na wiarygodność prezentowanej prognozy dominujący wpływ mają:

- rodzaj przyjętego kryterium,
- wartość graniczna parametru wynikająca z przyjętego kryterium,
- licznosc próby na podstawie której dokonywana jest prognoza.

Rodzaj przyjętego kryterium wynika przede wszystkim z subiektywnej oceny decydenta, który na podstawie własnego doświadczenia bądź sugestii otoczenia, dokonuje wyboru kryterium oceny stanu granicznego. Najczęściej wykorzystywanymi są kryteria techniczne, choć coraz częściej pod uwagę brane są kryteria ekonomiczne [1]. Licznosc próby zależy od możliwości badawczych. Większa próba z populacji sprzyja wzrostowi poziomu wiarygodności wyznaczania charakterystyk zmian parametru stanu w przyjętym kryterium.

W przypadku silnika 359M i jego zespołu TPC najczęściej wykorzystywanymi kryteriami przy wyznaczaniu stanów granicznych są kryteria techniczne. Różnice w ocenie wynikają przede wszystkim z wartości przyjętej miary [1]. W pracy [13] autor zaproponował nowe kryterium wyznaczania stanu granicznego zespołu TPC. Jego miarą jest osiągnięcie przez wybrane wskaźniki oceny stanu oleju wartości granicznych. Użytkowanie obiektu, w którym przekroczone zostały wartości graniczne lepkości ν_{100} (górną bądź dolną), powoduje pogorszenie warunków pracy smarowanego węzła tribologicznego, a tym samym wzrost intensywności zużycia tulei cylindrowej. To z kolei prowadzi do szybkiego osiągnięcia stanu granicznego zespołu TPC według kryterium technicznego.

3.3. Wyniki badań

W tabeli 1 zestawiono wyniki badań dotyczące oceny trwałości tulei cylindrowych silnika 359M. W zestawieniu uwzględniono kryterium, wartość graniczną proponowanego parametru oraz prognozowaną trwałość tulei cylindrowych według przyjętego kryterium.

W pracy [11] ocenę trwałości przeprowadzono w oparciu o wartość zużycia początkowego tulei cylindrowej z_0 (zmierzona odchyłka od wymiaru nominalnego $\varnothing=110$ [mm] dla nowej tulei [12]), średniej intensywności zużywania I_v , oraz wpływu ilości i temperatury rozruchów silnika na proces zużycia tulei. W pracy [12] kinetykę procesu zużycia opisano wykorzystując model liniowy.

Porównanie uzyskanych wartości prognozowanej trwałości tulei cylindrowych wskazuje na znaczne różnice pomiędzy wynikami ocen przedstawionych w pracach [11, 12], a wynikami autora. Zdaniem autora rozbieżności te wynikają z faktu, że Autorzy w/w prac nie wyodrębnili w proponowanych modelach kinetyki zużycia tulei cylindrowych procesu docierania. Średnią intensywność zużywania I_v tulei wyznaczyli dla całego okresu eksploatacji. Jest więc ona wypadkową intensywności zużywania w okresie docierania i okresu ustabilizowanego zużywania. Powoduje to zwiększenie obliczonej w ten sposób średniej intensywności zużywania, a co za tym idzie, skrócenie czasu pracy do osiągnięcia założonego zużycia granicznego. Zaproponowana w tym zakresie przez autora metoda wyznaczania kinetyki zużycia tulei [13] pozbawiona jest tej wady i dokonana z jej wykorzystaniem ocena wydaje się być uzasadniona i wiarygodna.

Potwierdzeniem zasadności tak przeprowadzonej prognozy trwałości tribologicznej według kryterium technicznego jest uzyskana przez autora informacja pochodząca od użytkownika samochodów STAR 1142 (Zakładu Transportu Samochodowego Poczty Polskiej w Lublinie), z której wynika, że badane silniki osiągnęły przebieg powyżej 400 tys.km i były nadal eksploatowane. Wskaźniki techniczno – ekonomiczne charakteryzujące ich stan techniczny utrzymywały się na wymaganym poziomie.

Tab. 1. Zestawienie prognoz trwałości tulei cylindrowych silnika 359M wg różnych kryteriów

Lp.	Źródło danych	Rodzaj 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.	[11]	techniczne	zużycie \bar{z} tulei cylindrowej na głębokościach 20, 30, 50 [mm] w płaszczyźnie A-A i B-B	126 [μm]	---	433,0	---
2.	[12]	techniczne	zużycie \bar{z} tulei cylindrowej na głębokości 20 [mm] w płaszczyźnie A-A i B-B	126 [μm]	---	394,1	---
3.	[14]	ekonomiczne	kryterium prognozy opłacalności oraz kryterium amortyzacji z uwzględnieniem średniej intensywności eksploatacji	---	---	420,0	---
4.	własne	techniczne	szczelność przestrzeni nadłokowej	75 [%]	---	539,6	---
5.	własne	techniczne	ciśnienie sprężania w cylindrach	2,4 [MPa]	---	328,2	---
6.	własne	techniczne	zużycie \bar{z} tulei cylindrowej na głębokościach 20, 35, 50, 95 [mm] w płaszczyźnie A-A i B-B	126 [μm]	516,0	621,5	781,3
7.	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	---

4. PODSUMOWANIE

Zaproponowane w pracy [13] kryterium olejowe uwzględnia możliwość prawidłowej oceny współpracy elementów złozenia TPC ze względu na rodzaj występującego tarcia. Przedstawiona 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.

Podjęta próba wykorzystania do prognozowania informacji o kinetyce takich symptomów diagnostycznych jak zmiany: szczelności przestrzeni nadłokowej, ciśnienia sprężania w cylindrach czy też zadymienia spalin oraz dostępnych wartości dopuszczalnych zmian dały wyniki prognoz znacznie różniące się od siebie. Odpowiednie wartości oczekiwane wynosiły ($539,6 \cdot 10^3$ km, $328,2 \cdot 10^3$ km, $243,1 \cdot 10^3$ km).

Szczegółowa analiza uzyskanych wyników pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, że tylko wykorzystanie do prognozowania metod opartych na kryterium technicznym (zużyciowym) i kryterium olejowym daje porównywalne i uzasadnione wyniki prognoz trwałości układu TPC. Łatwość zbierania informacji o kinetyce zmian własności olejów na podstawie wyników badań olejów wymienianych w silnikach oraz uzyskane wyniki empiryczne pozwalają na stwierdzenie: opracowana metoda prognostyczna oparta na tzw. kryterium olejowym daje wiarygodne wyniki prognoz trwałości tribologicznej. Pełnej weryfikacji przeprowadzonej w pracy oceny trwałości tribologicznej tulei cylindrowych można dokonać jedynie na drodze empirycznej, eksploatując badane silniki do osiągnięcia przez nie stanu granicznego według przyjętego kryterium – technicznego lub olejowego to znaczy do przebiegu w granicach $600 \div 700$ tys.km.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok – pierścienie tłokowe – cylinder silnika spalinowego*. WNT, Warszawa 1998.
- [2] Pronikow A.S.: *Nadieżność maszyn*. Maszynostrojenie, Moskwa 1978.
- [3] Magiera B.: *Stany graniczne olejów smarowych*. Trybologia nr 2/1984.
- [4] Staniewski J. W., Waliszewski A. Sz.: *Badania nad ustaleniem stanów granicznych olejów silnikowych*. Rozprawa doktorska. WM RiP Politechnika Poznańska, Poznań 1978.
- [5] Nadolny K., Staniewski J. W., Waliszewski A. Sz.: *O pewnych aspektach wyznaczania stanów granicznych olejów silnikowych*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn nr 1(53)/1983.
- [6] Nadolny K.: *Niezawodnościowe problemy eksploatacyjnych zmian jakości silnikowych olejów smarowych*. Politechnika Poznańska, Rozprawy nr 164, Poznań 1985.
- [7] Norma PN-80/N-04000. *Niezawodność w technice. Terminologia*.
- [8] Włodarski J.K.: *Tłokowe silniki spalinowe – procesy trybologiczne*. WKiŁ, Warszawa 1982.

- [9] Kozaczewski W.: *Konstrukcja złożów tłok-cylinder silników spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 1987.
- [10] Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: *Silniki samochodowe*. WNT, Warszawa 1986.
- [11] Drożdżel P.: *Metoda oceny eksploatacyjnej trwałości tłokowego silnika samochodowego z uwzględnieniem przebiegu rozruchu*. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1998.
- [12] Ignaciuk P.: *Metoda badania wpływu wybranych czynników technologicznych na trwałość eksploatacyjną silników spalinowych o zapłonie samoczynnym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1998.
- [13] Chmielewski Z.: *Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji*. Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2001.
- [14] Niewczs A., Drożdżel P., Ignaciuk P., Koszałka G., Krzywonos L.: *Raport Merytoryczny z realizacji projektu badawczego KBN Nr 9 S604 047 06 pt. "Trwałość trybologiczna silników spalinowych w warunkach obciążeń regularnie zmiennych i losowych"*. Lublin 1997 (raport niepublikowany).
- [15] 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.
- [16] Chmielewski Z.: *Badania oleju silnikowego jako źródła informacji o stanie technicznym silnika spalinowego o ZS*. *Logistyka* nr 2/2010, *Logistyka – nauka*, s. 142.
- [17] Koszałka G.: *Wykorzystanie modelu szczelności układu TPC do oceny eksploatacyjnych zmian napięcia przedmuchi spalin do skrzyni korbowej*. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 4(48)/2010, s. 72-81