

**Dr inż. Grzegorz Koszałka**

Instytut Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii  
Politechnika Lubelska  
Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
E-mail: g.koszalka@pollub.pl

## **Model eksploatacyjnych zmian szczelności przestrzeni nadłokowej silnika o zapłonie samoczynnym**

**Słowa kluczowe:** silnik spalinowy, uszczelnienie pierścieniowe, diagnostyka, model stochastyczny, ciśnienie sprężania, przedmuchy spalin, zużycie

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań szczelności komory spalania silnika o zapłonie samoczynnym w czasie długotrwałej eksploatacji. Badania przeprowadzono na 5 egzemplarzach sześciocyndrowego silnika wykorzystywanego do napędu samochodów ciężarowych. Zmiany szczelności w zakresie przebiegów 0-500 tys. km określono na podstawie wyników pomiarów: spadku ciśnienia z wykorzystaniem próbnika szczelności komory spalania, maksymalnego ciśnienia sprężania w cylindrach oraz natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej w różnych warunkach pracy silnika.

Wyniki badań poddano analizie statystycznej. Opracowano stochastyczne modele zmian szczelności komory spalania silnika w funkcji przebiegu samochodu. Model opisuje przebieg wartości średniej wybranego parametru diagnostycznego w czasie oraz granic obszaru prawdopodobnych zmian tego parametru. Wyniki badań wykazały, że zarówno prędkość, jak i charakter zmian w funkcji czasu eksploatacji, były różne dla różnych parametrów. Najmniejszą dynamiką zmian wyróżniało się maksymalne ciśnienie sprężania (spadek o mniej niż 20% w zakresie przebiegów samochodu: 0-500 tys. km), średnią dynamiką – wskaźnik szczelności, a największą – natężenie przedmuchów spalin (3-krotny wzrost przy 2200 obr/min), przy czym dla dwóch pierwszych parametrów szybkość zmian zwiększała się wraz z przebiegiem samochodu, natomiast w przypadku przedmuchów spalin zmiany miały charakter liniowy. Wyznaczono również pola rozproszeń (zmian odchyłeń standardowych) dla badanych parametrów diagnostycznych.

### **1. Wprowadzenie**

Szczelność komory spalania jest jedną z najważniejszych cech decydujących o stanie technicznym silnika spalinowego. Podczas eksploatacji, na skutek zużycia tulei cylindrowej, pierścieni tłokowych i rowków pierścieniowych tłoka wzrastają luzy w uszczelnieniu tłok-pierścienie-cylinder. Dlatego szczelność komory spalania ulega pogorszeniu. Spadek szczelności obniża osiągi silnika, zwiększa zużycie paliwa i oleju silnikowego oraz emisję związków toksycznych, obniża zdolności rozruchowe zimnego silnika, a także przyspiesza degradację oleju silnikowego oraz zużycie elementów zespołu tłok-pierścienie-cylinder [2, 3, 5, 12, 13, 14, 16].

Powszechnie stosowanymi miarami szczelności komory spalania są parametry diagnostyczne, takie jak: ciśnienie sprężania w cylindrze, podciśnienie w przewodzie dolotowym, względny spadek ciśnienia sprężonego powietrza doprowadzonego do cylindra czy natężenie przedmuchów spalin do skrzyni korbowej [12]. Znajomość eksploatacyjnych zmian tych parametrów, w tym intensywności i charakteru zmian (liniowy bądź nieliniowy) oraz rozproszenia wyników pomiarów, jest ważna z punktu widzenia diagnozowania stanu

technicznego, a także prognozowania trwałości i oceny niezawodności silnika [1, 4, 8, 9, 10, 17]. Może być również pomocna przy modelowaniu uszczelnienia pierścieniowego silnika [7, 15, 18]. W literaturze można znaleźć wiele ogólnych opisów różnych modeli zmian stanu technicznego obiektów technicznych [11]. Jednak ilościowe informacje na temat rzeczywistych zmian parametrów charakteryzujących stan techniczny układu tłok-pierścienie-cylinder w czasie rzeczywistej eksploatacji silnika są bardzo nieliczne [14].

Przebieg zmian szczelności przestrzeni nadłokowej od chwili wyprodukowania do chwili osiągnięcia stanu granicznego dla obiektów eksploatowanych w normalnych warunkach jest bardzo rzadko badany głównie ze względu na długi czas i koszty badań. Wyniki takie można uzyskać w badaniach skróconych – metodą prób warstwowych [13]. W ramach skróconych badań wykonuje się pomiary prób statystycznych samochodów o różnych przebiegach eksploatacyjnych. Wyniki badanych prób analizuje się łącznie wyznaczając model zmian danego parametru w całym okresie eksploatacji samochodu. Wadą tej metody jest niepewność założenia, że między badanymi obiektami o różnych przebiegach nie ma różnic systematycznych.

Celem opisanych w artykule badań było opracowanie stochastycznych modeli zmian parametrów diagnostycznych charakteryzujących szczelność komory spalania szybkoobrotowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym w funkcji przebiegu samochodu na podstawie długotrwałych obserwacji jednorodnej próby obiektów, w przeciwieństwie do metody obserwacji prób warstwowych. Modele te powinny umożliwiać określenie tendencji rozwojowych wartości średniej oraz pola rozprożeń rozpatrywanych parametrów w funkcji czasu eksploatacji silnika.

## **2. Obiekt i metoda badań**

Obiektem badań był sześciocyldrowy silnik wysokoprężny o objętości skokowej  $6,8 \text{ dm}^3$ , maksymalnym momencie obrotowym 432 Nm uzyskiwanym w zakresie 1800-2200 obr/min i mocy znamionowej 110 kW uzyskiwanej przy 2800 obr/min. Silnik posiadał mokre tuleje cylindrowe wykonane z żeliwa o nominalnej średnicy wewnętrznej 110 mm. Aluminiowy tłok posiadał toroidalną komorę spalania oraz żeliwną wkładką pod pierwszy rowek pierścieniowy. Pierwszy pierścień uszczelniający był pierścieniem trapezowym, drugi prostokątnym, a dwuwargowy pierścień zgarniający wyposażony był w sprężynę spiralną. Skok tłoka wynosił 120 mm. Silnik posiadał dwa zawory na cylinder napędzane przez wałek rozrządu umieszczony w korpusie silnika, poprzez drążki popychaczy oraz dźwignienki zaworowe.

Badaniom poddano 5 silników zamontowanych w średniej ładowności samochodach ciężarowych o dopuszczalnej masie całkowitej 12 ton. Badania przeprowadzono w warunkach normalnej eksploatacji. Wszystkie samochody należały do jednej firmy transportowej i eksploatowane były w podobnych warunkach. Do smarowania silników używano takiego samego oleju silnikowego klasy CE/SF SAE 15W/40. Średni przebieg samochodów wynosił 10.000 km na miesiąc.

Okresowo silniki poddawano pomiarom kontrolnym, w tym pomiarom diagnostycznym pozwalającym na ocenę szczelności komory spalania. Częstość przeprowadzanych pomiarów związana była z ich połączeniem z okresowymi przeglądami technicznymi silników, co pozwoliło ograniczyć ilość czynności obsługowych oraz zminimalizować zakłócenia w eksploatacji samochodu. Do osiągnięcia przez samochód przebiegu 100 tys. km pomiary wykonywano co ok. 15 tys. km, natomiast po przekroczeniu 100 tys. km pomiary wykonywano co ok. 50 tys. km. Ponadto badania wykonywane były w tym samym miejscu przez te same osoby i z wykorzystaniem tych samych przyrządów. Pozwoliło to zmniejszyć błąd związany z niepowtarzalnością warunków pomiarowych.

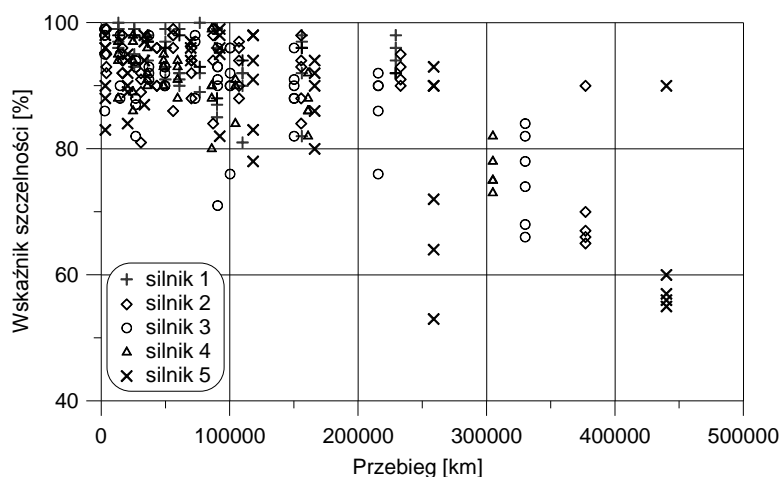
Do oceny szczelności przestrzeni nadtłokowej zastosowano następujące metody diagnostyczne:

- pomiar wskaźnika szczelności komory spalania,
- pomiar ciśnienia sprężania w cylindrach,
- pomiar natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej.

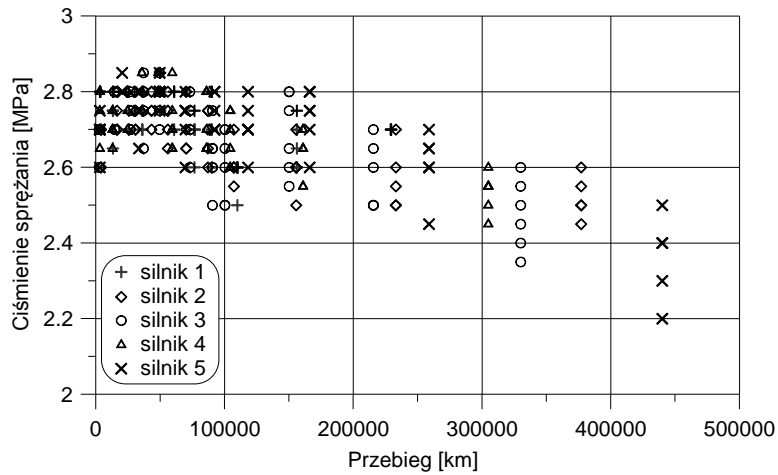
Wskaźnik szczelności komory spalania wyznaczano metodą pomiaru względnego spadku ciśnienia sprężonego powietrza doprowadzonego do komory spalania przez otwór wtryskiwacza, przy położeniu tłoka w GMP po suwie sprężania. Do pomiaru używano próbnika szczelności cylindrów PSC-2M. Ciśnienie sprężania, tj. maksymalne ciśnienie w komorze spalania w końcu suwu sprężania mierzono za pomocą sterowanego próbnika ciśnienia sprężania SPCS-50. Pomiary ciśnienia sprężania i wskaźnika szczelności wykonywano kolejno we wszystkich 6 cylindrach na nagrzanym silniku. Pomiary natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej wykonywano zarówno podczas pracy silnika na biegu jałowym (ok. 600 obr/min) oraz na hamowni podwoziowej przy pełnym obciążeniu silnika (maksymalne położenie pedału przyspiesznika) i następujących prędkościach obrotowych wału korbowego: 1570, 1880, 2200 i 2800 obr/min.

### 3. Wyniki badań

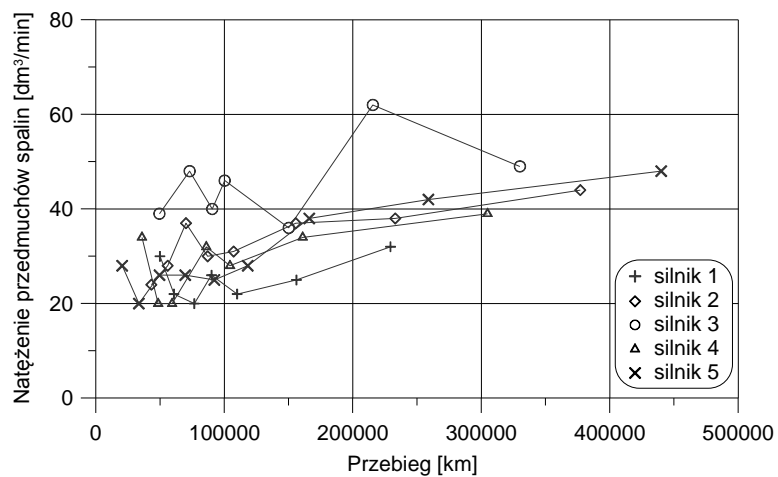
Uzyskane w badaniach eksploatacyjnych wartości parametrów diagnostycznych dla poszczególnych cylindrów, tj. wyniki pomiarów wskaźnika szczelności i ciśnienia sprężania przedstawiono na rys. 1 i 2, natomiast wyniki pomiarów natężenia przedmuchów spalin dla poszczególnych silników, przy różnych prędkościach obrotowych wału korbowego, przedstawiono na rys. 3-7. Wyniki pomiarów charakteryzowały się znacznymi rozrzutami. Ponadto, nawet dla tego samego obiektu, zmiany wybranego parametru diagnostycznego w funkcji przebiegu kilometrowego samochodu nie zawsze były monotoniczne. Dlatego wyniki pomiarów diagnostycznych analizowano łącznie dla wszystkich badanych cylindrów i silników stosując metody statystyczne.



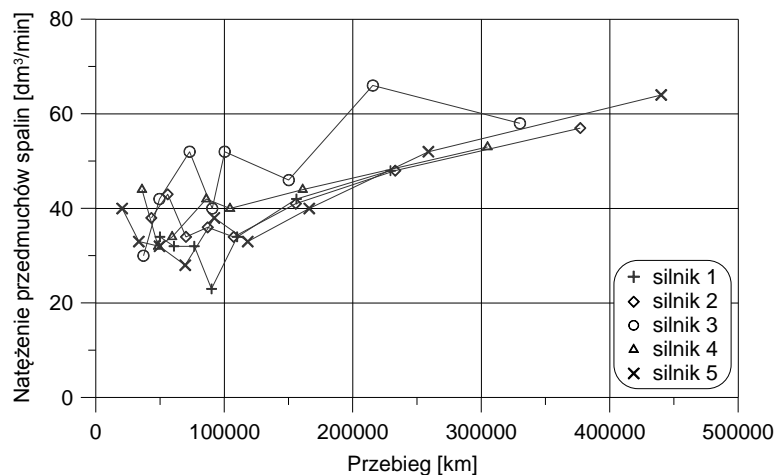
Rys. 1. Wyniki pomiarów wskaźnika szczelności komory spalania



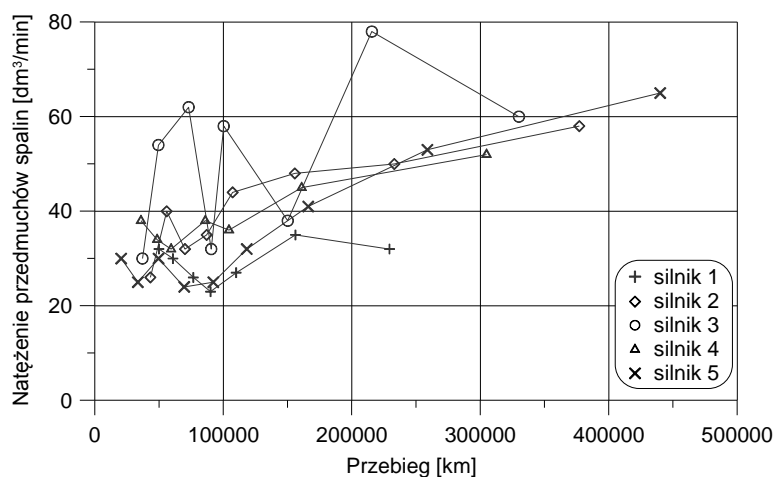
Rys. 2. Wyniki pomiarów ciśnienia sprężania



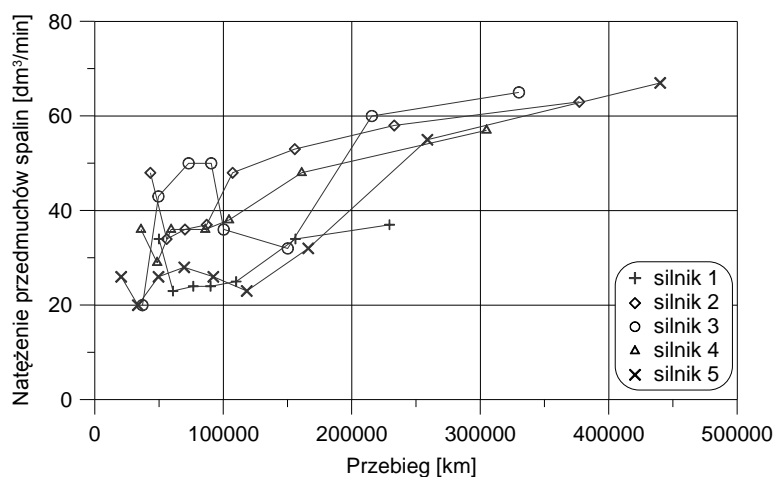
Rys. 3. Wyniki pomiarów natężenia przedmuchów spalin podczas pracy silnika na biegu jałowym



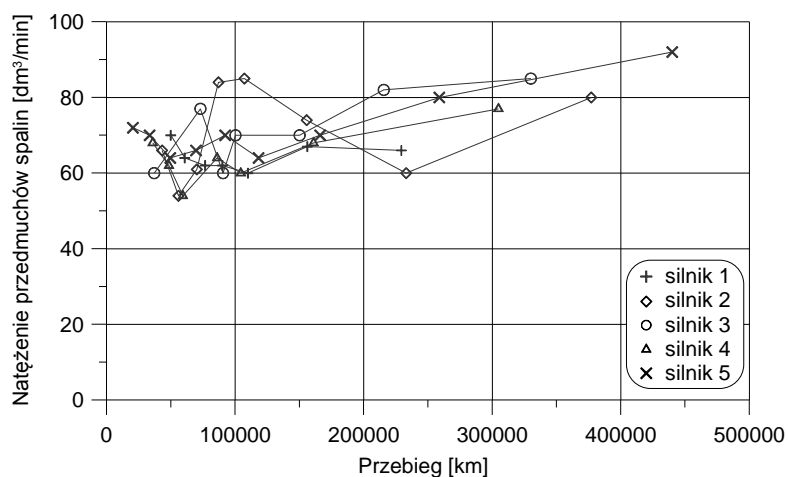
Rys. 4. Wyniki pomiarów natężenia przedmuchów spalin podczas pracy silnika przy pełnym obciążeniu z prędkością obrotową 1570 obr/min



Rys. 5. Wyniki pomiarów natężenia przedmuchów spalin podczas pracy silnika przy pełnym obciążeniu z prędkością obrotową 1880 obr/min



Rys. 6. Wyniki pomiarów natężenia przedmuchów spalin podczas pracy silnika przy pełnym obciążeniu z prędkością obrotową 2200 obr/min



Rys. 7. Wyniki pomiarów natężenia przedmuchów spalin podczas pracy silnika przy pełnym obciążeniu z prędkością obrotową 2800 obr/min

#### 4. Model empiryczny

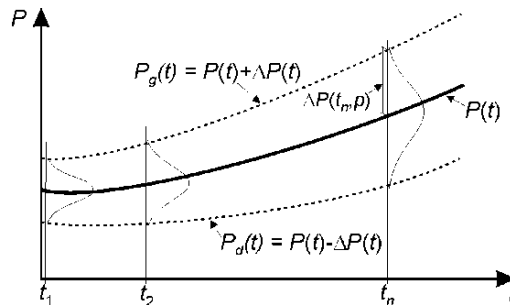
Opracowane modele powinny dostarczać informacji nt. średniego przebiegu wybranego parametru w czasie  $P(t)$  oraz granic wyznaczających zakres, w którym może

znajdować się parametr  $P$  z założonym prawdopodobieństwem  $p$ . Zakres ten opisać można za pomocą równań:

$$P_d(t) = P(t) - \Delta P(t), \quad (1)$$

$$P_g(t) = P(t) + \Delta P(t), \quad (2)$$

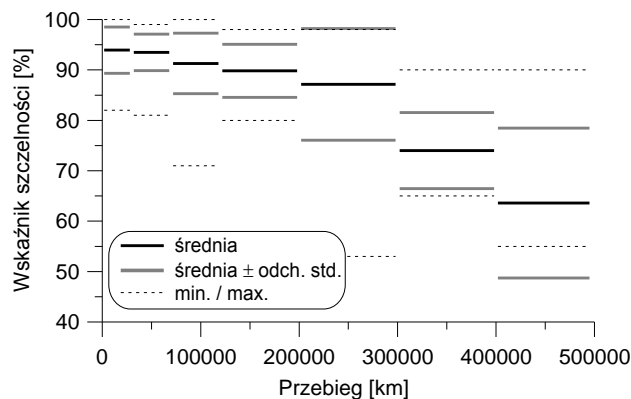
gdzie:  $P(t)$  jest przebiegiem średnim parametru diagnostycznego,  $P_d(t)$  i  $P_g(t)$  są odpowiednio dolną i górną granicą przedziału ufności,  $\Delta P(t)$  jest szerokością przedziału ufności dla przyjętego poziomu istotności, a  $t$  jest przebiegiem samochodu (rys. 8).



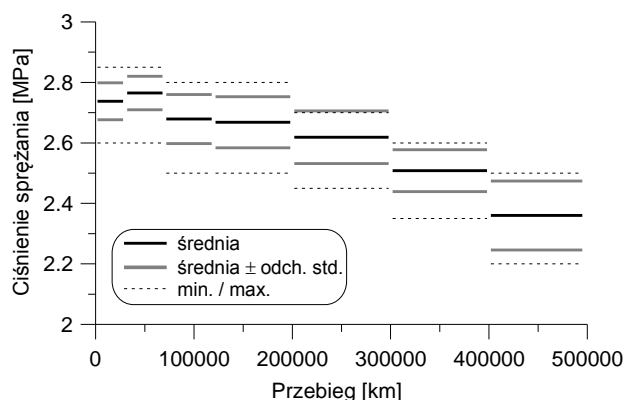
Rys. 8. Stochastyczny model zmian parametru diagnostycznego  $P$  w czasie eksploatacji

Przyjęto, że najlepszym przebiegiem średnich zmian danego parametru diagnostycznego  $P(t)$  będzie krzywa regresji wyznaczona na podstawie wszystkich wyników pomiarów. Przeanalizowano różne krzywe regresji, tj. funkcję liniową, wykładniczą oraz wielomian drugiego stopnia. Do opisu średnich zmian danego parametru wybrano tę funkcję, dla której współczynnik determinacji  $R^2$  był największy. W tabeli 1 podano równania regresji liniowej i wybrane równania regresji krzywoliniowej oraz wartości współczynników determinacji.

W celu określenia rozproszenia wyników pomiarów wokół wartości średniej obliczono wartości odchyłeń standardowych dla wyników pomiarów uzyskanych w kilku różnych przedziałach przebiegu samochodów. Ustalając wielkości przedziałów wzięto pod uwagę liczbę pomiarów jakimi dysponowano – większa liczba pomiarów przy mniejszych przebiegach. Przyjęto następujące przedziały przebiegu: 0-30.000, 30.000-70.000, 70.000-120.000, 120.000-200.000, 200.000-300.000, 300.000-400.000 i powyżej 400.000 km, przy czym w przypadku natężenia przedmuchiów spalin dwa ostatnie przedziały połączono, ze względu na małą liczbę pomiarów. Na przykładzie wskaźnika szczelności i ciśnienia sprężania, na rys. 9 i 10 przedstawiono w sposób graficzny podstawowe statystyki opisowe dla poszczególnych zakresów przebiegu.

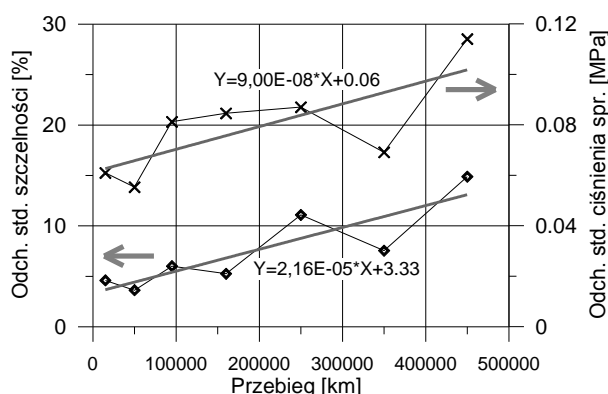


Rys. 9. Wartości wskaźnika szczelności w różnych zakresach przebiegu eksploatacyjnego samochodu



Rys. 10. Wartości ciśnienia sprężania w różnych zakresach przebiegu eksploatacyjnego samochodu

Wartości odchyłeń standardowych zmieniały się wraz z przebiegiem eksploatacyjnym samochodu w sposób nieregularny (rys. 9-11). Aby wyznaczyć granice przedziałów ufności przyjęto, że odchylenie standardowe zmienia się w sposób liniowy wraz z przebiegiem samochodu. Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono odpowiednie proste regresji. Na rys. 11 przedstawiono wartości odchyłeń standardowych dla poszczególnych przedziałów oraz proste regresji dla ciśnienia sprężania i wskaźnika szczelności. Wyznaczone w ten sposób równania prostych regresji odchylenia standardowego dla wszystkich badanych parametrów diagnostycznych zestawiono w tab. 1.



Rys. 11. Odchylenia standardowe wskaźnika szczelności i ciśnienia sprężania

Tab. 1. Wyniki analizy regresji dla poszczególnych parametrów diagnostycznych

Parametr diagnostyczny	Równanie regresji	Współczynnik determinacji $R^2$	Równanie regresji odch. standardowego
1	2	3	4
Wskaźnik szczelności	$y = -1,58E-10t^2 - 5,09E-07t + 93,7$ $y = -5,75E-05t + 96,3$	0,516 0,463	$Y = 2,16E-05t + 3,33$
Ciśnienie sprężania	$y = -8,41E-13t^2 - 4,60E-07t + 2,76$ $y = -7,56E-07t + 2,77$	0,502 0,493	$Y = 9,00E-08t + 0,06$
Natężenie przedmuchów na biegu jałowym	$y = 5,88E-05t + 25,3$ $y = 2,53E+01e^{1,72E-06t}$	0,372 0,366	$Y = -9,12E-07t + 7,70$
Natężenie przedmuchów przy 1570 obr/min	$y = 7,41E-05t + 31,8$ $y = 3,25E+01e^{1,65E-06t}$	0,574 0,512	$Y = -2,65E-06t + 6,15$
Natężenie przedmuchów przy 1880 obr/min	$y = 8,57E-05t + 28,8$ $y = 2,93E+01e^{2,00E-06t}$	0,421 0,409	$Y = -1,50E-06t + 10,2$
Natężenie przedmuchów	$y = 1,01E-04t + 26,0$	0,567	$Y = -1,30E-05t + 11,1$

przy 2200 obr/min	$y = 3,99E-12x^2 + 1,00E-04x + 26,0$	0,566	
Natężenie przedmuchiów przy 2800 obr/min	$y = 1,17E-10x^2 + 7,49E-06x + 64,8$ $y = 5,47E-05t + 61,8$	0,397 0,374	$Y = 4,21E-06t + 6,13$

Przyjęto, że średni przebieg danego parametru jest równy:

$$P(t) = y(t) \quad (3)$$

gdzie  $y(t)$  jest równaniem regresji z kolumny 2 w tab. 1, dla którego współczynnik determinacji  $R^2$  uzyskał większą wartość.

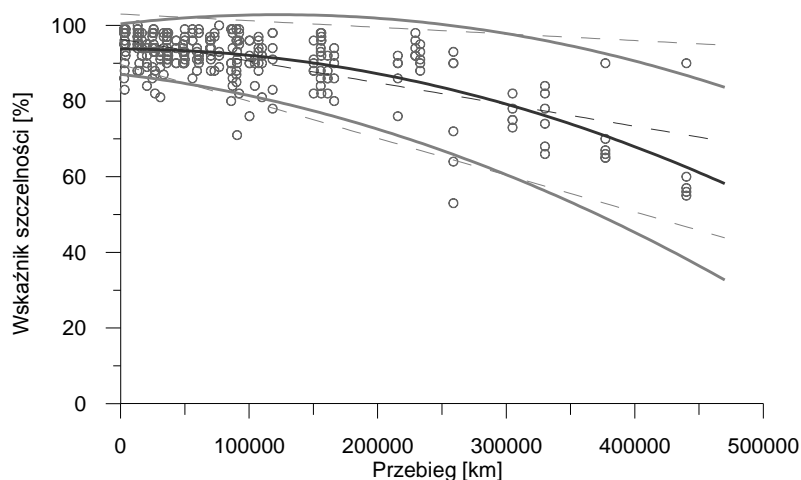
Na podstawie testów Kołmogorowa-Smirnowa na poziomie ufności 0,99 można uznać, że wyniki pomiarów ciśnienia sprężana i wskaźnika szczelności w poszczególnych zakresach przebiegów były zgodne z rozkładem normalnym. Przyjmując, że wyniki pomiarów mają rozkłady normalne, granice przedziałów ufności, na poziomie istotności 0,05, wyznaczone są funkcjami:

$$P_d(t) = P(t) - \Delta P(t) = y(t) - 2 \cdot Y(t), \quad (4)$$

$$P_g(t) = P(t) + \Delta P(t) = y(t) + 2 \cdot Y(t), \quad (5)$$

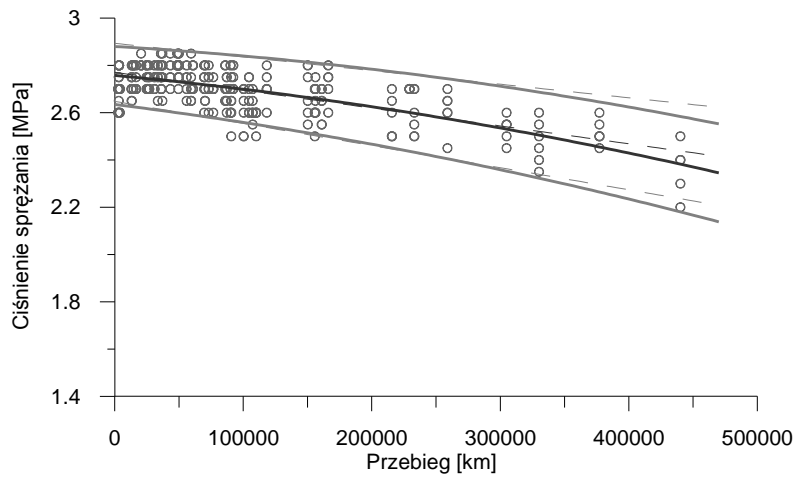
gdzie  $Y(t)$  jest równaniem prostej regresji odchylenia standardowego podanym w tabeli 1.

Wyznaczone w ten sposób modele zmian parametrów diagnostycznych charakteryzujących szczelność komory spalania silnika z zaznaczonymi granicami przedziałów ufności na poziomie 95% przedstawiono na rys. 12-18 (linie ciągłe). Na rys. 12-18, cienkimi liniami przerywanymi, przedstawiono również konkurencyjne modele zmian parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu: liniowe, w przypadkach, w których wybrano modele krzywoliniowe, oraz krzywoliniowe, w przypadkach, w których wybrano modele liniowe.

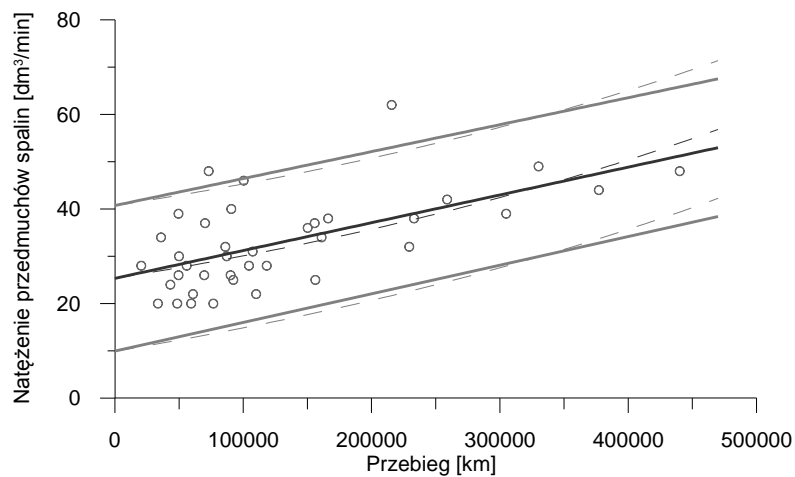


Rys. 12. Zmiany wskaźnika szczelności komory spalania w funkcji przebiegu samochodu

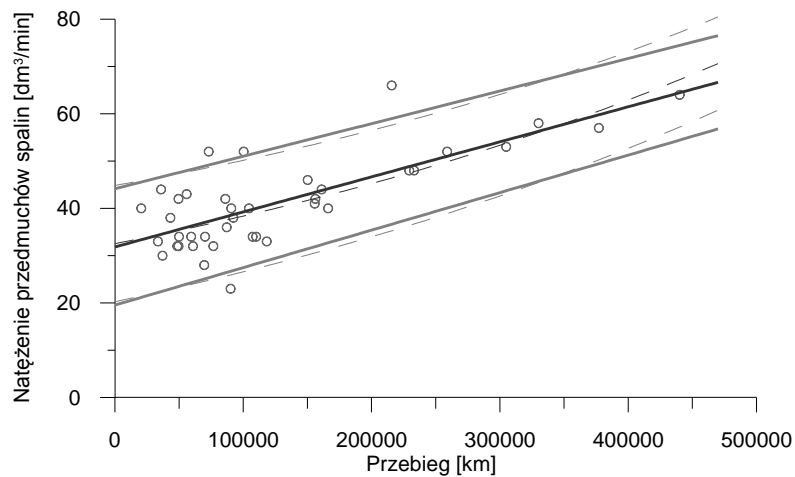




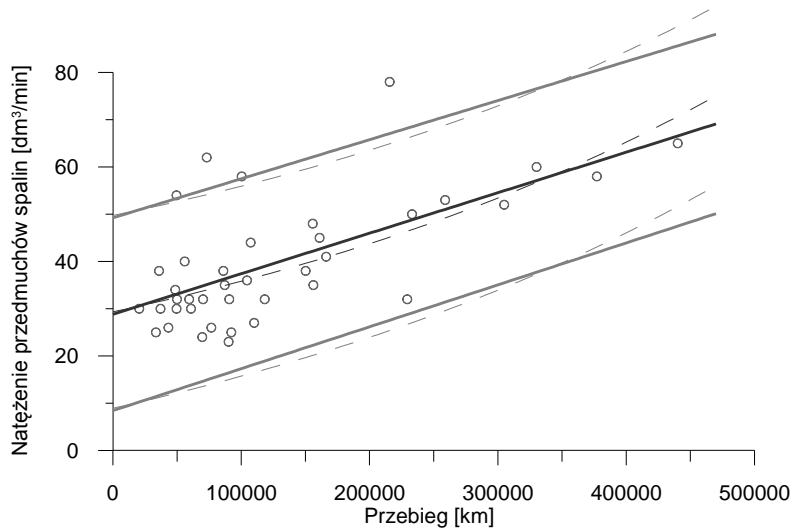
Rys. 13. Zmiany ciśnienia sprężania w funkcji przebiegu samochodu



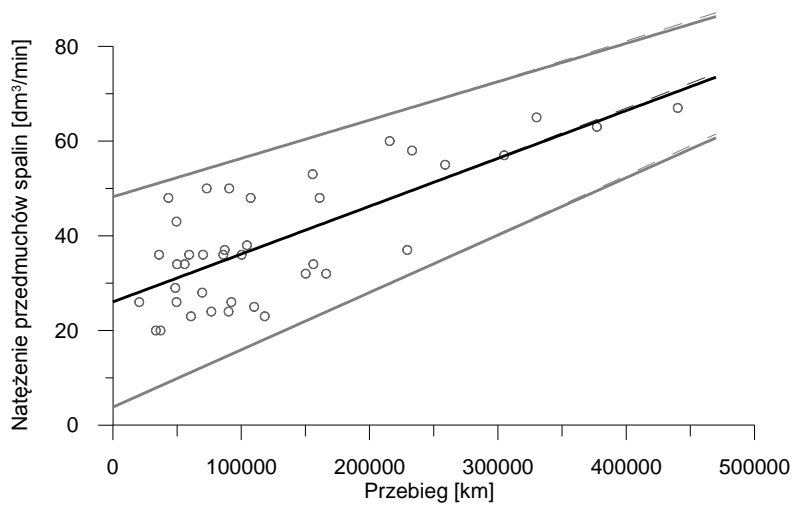
Rys. 14. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej na biegu jałowym silnika w funkcji przebiegu samochodu



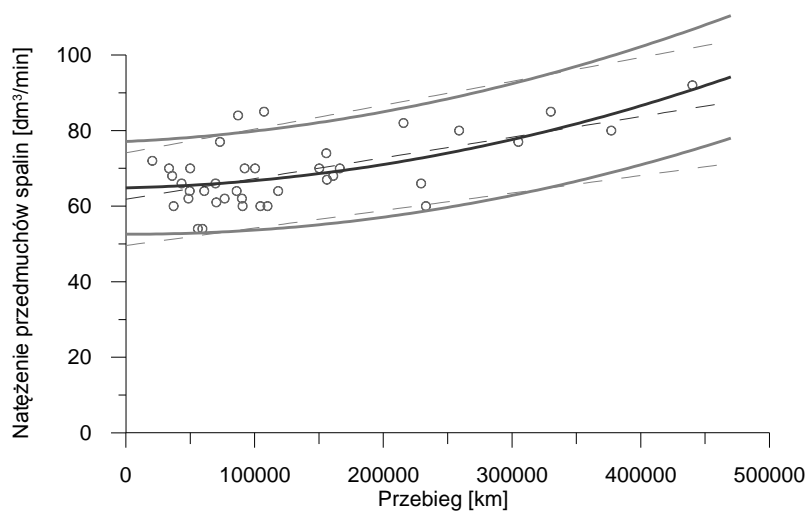
Rys. 15. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej podczas pracy silnika z pełnym obciążeniem przy prędkości obrotowej 1570 obr/min w funkcji przebiegu samochodu



Rys. 16. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej podczas pracy silnika z pełnym obciążeniem przy prędkości obrotowej 1880 obr/min w funkcji przebiegu samochodu



Rys. 17. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej podczas pracy silnika z pełnym obciążeniem przy prędkości obrotowej 2200 obr/min w funkcji przebiegu samochodu



Rys. 18. Zmiany natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej podczas pracy silnika z pełnym obciążeniem przy prędkości obrotowej 2800 obr/min w funkcji przebiegu samochodu

## 5. Dyskusja

Średnie wartości wszystkich analizowanych parametrów zmieniały się wraz z przebiegiem samochodu wskazując na pogarszający się stan techniczny silnika. Jednak szybkość zmian i ich charakter dla poszczególnych parametrów były różne. Do scharakteryzowania dynamiki zmian parametru wraz z przebiegiem zastosowano wskaźnik:

$$x_d = \frac{P(t_2) - P(t_1)}{P(t_1)} \cdot 100\% , \quad (6)$$

gdzie  $P(t_2)$  jest wartością danego parametru diagnostycznego wyznaczoną z wzoru (3) dla przebiegu  $t_2$  będącego końcem odcinka, w którym oceniana jest dynamika zmian parametru, a  $P(t_1)$  jest wartością parametru dla przebiegu  $t_1$  będącego początkiem tego odcinka.

Średnia wartość ciśnienia sprężania po przebiegu 500 tys. km zmniejszyła się w stosunku do stanu przy zerowym przebiegu tylko o 16%. Średnia wartość wskaźnika szczelności, w tym samym zakresie przebiegów, zmaląła o 42%. Natomiast natężenia przedmuchiów spalin zwiększyły się znacznie bardziej, tj. o 116% w warunkach biegu jałowego, a przy pełnym obciążeniu silnika o: 117% przy 1570 obr/min, 149% przy 1880 obr/min, 194% przy 2200 obr/min i 51% przy 2800 obr/min. Dużo mniejszy względny wzrost natężenia przedmuchiów spalin przy pełnym obciążeniu silnika i prędkości obrotowej wału korbowego 2800 obr/min związany był z około dwukrotnie większymi bezwzględными wartościami przedmuchiów w tych warunkach pracy silnika, w porównaniu z natężeniami przedmuchiów w innych warunkach, w których wykonywano pomiary.

W czterech przypadkach otrzymane modele są modelami liniowymi, a w trzech nieliniowymi. Jednak tylko w przypadku wskaźnika szczelności i natężenia przedmuchiów spalin przy 1570 obr/min różnice pomiędzy współczynnikami determinacji dla regresji liniowej i krzywoliniowej są duże, wskazując na dużo lepsze dopasowanie wybranej krzywej regresji. W pozostałych przypadkach różnice te są małe i nie pozwalają na zdecydowany wybór charakteru zmian parametru w funkcji przebiegu. W związku z tym, dodatkowo oceniono przyrosty średnich wartości parametrów dla kolejnych zakresów przebiegu. Zmiany wskaźnika szczelności oraz ciśnienia sprężania w pierwszym okresie eksploatacji były mniejsze, niż w drugim – powyżej 300 tys. km (rys. 9 i 10). Ponadto w przypadku ciśnienia sprężania zaobserwowano poprawę w początkowym okresie eksploatacji. Porównano również wartości wskaźnika (6) wyznaczone w oparciu o średnie dla pierwszego i ostatniego zakresu przebiegu z wartościami tego wskaźnika wyznaczonymi w oparciu o równania regresji liniowej i krzywoliniowej (Tab. 2).

Wyniki powyższych ocen pozwalają uznać, że zmiany wskaźnika szczelności oraz ciśnienia sprężania wraz z przebiegiem miały charakter nieliniowy – ich intensywność wzrastała wraz z przebiegiem. Natomiast w przypadku przedmuchiów spalin przy 1570 obr/min oraz przy 1880 obr/min należy uznać, że zmiany miały charakter liniowy. W pozostałych przypadkach należy wskazać na modele wybrane na podstawie współczynników determinacji, choć modele konkurencyjne również wydają się możliwe do zaakceptowania.

Tab. 2. Wartości wskaźnika dynamiki zmian oraz współczynnika zmienności

	$x_d$ obliczony na podstawie średnich z pierwszego i ostatniego przedziału przebiegów, [%]	$x_d$ obliczony na podstawie równania regresji krzywoliniowej, [%]**	$x_d$ obliczony na podstawie równania regresji liniowej, [%]**	Współczynnik zmienności V, [%] (wyznaczony dla przebiegu 250000 km)
Wskaźnik szczelności	-32,3	-32,9	-25,6	10,4
Ciśnienie sprężania	-14,6	-13,0	-11,6	3,18

Przedmuchy jałowy	bieg	71,3 *	73,4	66,6	18,7
Przedmuchy obr/min	1570	64,9 *	69,6	66,8	10,9
Przedmuchy obr/min	1880	78,5 *	89,6	82,9	19,6
Przedmuchy obr/min	2200	100,5 *	104,9	104,1	15,3
Przedmuchy obr/min	2800	31,6 *	27,7	27,1	9,71

\* dla natężenia przedmuchów spalin pierwszym przedziałem jest zakres 30000-70000 km

\*\*  $x_d$  w przypadku wskaźnika szczelności i ciśnienia sprężania wyznaczono dla  $t_1 = 15000$  i  $t_2 = 440000$ , natomiast w przypadku przedmuchów dla  $t_1 = 50000$  i  $t_2 = 370000$

Rozproszenia wyników pomiarów poszczególnych parametrów diagnostycznych były różne zarówno jeśli chodzi o wartości, jak i charakter ich zmian wraz z przebiegiem.

Odchylenie standardowe wskaźnika szczelności, w zakresie przebiegów 0-500 tys. km, wzrosło ponad trzykrotnie, natomiast w przypadku ciśnienia sprężania o 75%. Zmiany te w przypadku przedmuchów spalin były mniejsze, przy czym wzrost wraz z przebiegiem (o 34%) odnotowano tylko przy 2800 obr/min, a w pozostałych warunkach pracy silnika zaobserwowano zmniejszenie: od 6% do 58%. Należy jednak pamiętać, że w przypadku przedmuchów spalin odchylenia standardowe wyznaczone były w oparciu o sześciokrotnie mniejszą liczbę pomiarów, niż w przypadku wskaźnika szczelności i ciśnienia sprężania, i dwa ostatnie przedziały przebiegów zawierały tylko po 4 wyniki pomiarów. Biorąc powyższe pod uwagę należy uznać, że w oparciu o posiadane wyniki nie można jednoznacznie stwierdzić, czy i jak rozproszenie wyników pomiarów zmienia się wraz z przebiegiem w przypadku natężenia przedmuchów spalin. Posiadane wyniki nie zaprzeczają hipotezie, że odchylenia standardowe w przypadku natężenia przedmuchów spalin są stałe – nie zależą od przebiegu samochodu.

Do ilościowej oceny rozproszenia wyników pomiarów poszczególnych parametrów diagnostycznych zastosowano współczynnik zmienności:

$$V = \frac{S}{P} \cdot 100\% , \quad (7)$$

gdzie  $S$  jest odchyleniem standardowym, a  $P$  wartością średnią.

Wartości współczynnika zmienności wraz z przebiegiem zmieniały się znacząco tylko w przypadku wskaźnika szczelności: od 3,6% przy przebiegu 0 km do 26% przy 500 tys. km – siedmiokrotny wzrost (równoczesny duży wzrost  $S$  i spadek  $P$ ). W przypadku pozostałych parametrów zmiany te były znacznie mniejsze, dzięki czemu do oceny rozproszenia wyników pomiarów można wykorzystać wartości średnie  $V$  – wyznaczone dla przebiegów 250.000 km. Porównując współczynnik zmienności poszczególnych parametrów diagnostycznych przy przebiegu 250 tys. km należy stwierdzić, że najmniejszą zmiennością cechowały się pomiary ciśnienia sprężania – ok 3%, natomiast największą pomiary natężenia przedmuchów spalin – 10-20% w zależności od prędkości obrotowej silnika (Tab. 2).

Intensywności i charakterystyki zmian analizowanych parametrów diagnostycznych wraz z przebiegiem samochodu były różne mimo, że wszystkie charakteryzują szczelność komory spalania. Związane to było z różnymi stanami, w jakich znajdował się silnik w czasie pomiaru: pomiar wskaźnika szczelności wykonywane były przy nieruchomym silniku, pomiar ciśnienia sprężania przy silniku obracającym rozrusznikiem, a pomiary natężenia przedmuchów spalin przy silniku pracującym.

## 6. Podsumowanie

Analizowano charakter zmian parametrów szczelności komory spalania w 5 samochodach podczas ich długotrwałej eksploatacji. Wyznaczono stochastyczne modele zmian parametrów diagnostycznych w funkcji przebiegu samochodu. Przebiegi wartości średniej oraz przebiegi odchylenia standardowego, jako parametrów chwilowego rozkładu wyników pomiarów diagnostycznych, wyznaczono w oparciu o analizę regresji.

Stwierdzono, że wskaźnik szczelności oraz ciśnienie sprężania zmieniały się wraz z przebiegiem w sposób nieliniowy, tj. intensywność ich zmian wraz z przebiegiem zwiększała się. Szybkość zmian wskaźnika szczelności była 3-krotnie większa, niż ciśnienia sprężania – odpowiednio spadek o 42% i 16% w zakresie przebiegów 0-500.000 km. Dla tych parametrów diagnostycznych zwiększały się również wraz z przebiegiem wartości odchylenia standardowego – w przypadku wskaźnika szczelności 4-krotnie szybciej, niż w przypadku ciśnienia sprężania.

Natężenie przedmuchów spalin cechowało się znacznie większą dynamiką zmian – w zakresie przebiegów 0-500.000 km zwiększyło się ono 3-krotnie (przy prędkości obrotowej silnika 2200 obr/min). Zmiany natężenia przedmuchów spalin wraz z przebiegiem samochodu miały charakter liniowy (wyjątkiem było natężenie przedmuchów przy 2800 obr/min). Rozrzuty wyników pomiarów przedmuchów spalin były większe, niż w przypadku wskaźnika szczelności i ciśnienia sprężania, jednak nie zwiększały się one wraz z przebiegiem samochodu.

Wyznaczone modele zmian parametrów diagnostycznych charakteryzujących szczelność komory spalania, po skorelowaniu z informacjami o zużyciu elementów silnika [6], zostaną wykorzystane jako baza odniesienia do zweryfikowania wyników symulacyjnych badań natężenia przedmuchów spalin opartych na analitycznym modelu uszczelnienia układu TPC.

**Podziękowania:** Praca dofinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań w ramach projektu badawczego realizowanego w latach 2010-2012.

## Literatura

1. Giorgio M, Guida M, Pulcini G. A state-dependent wear process with an application to marine engine cylinder liners. *Technometrics* 2010; 52 (2): 172–187.
2. Jones N B, Li Y-H. A review of condition monitoring and fault diagnosis for diesel engines. *Tribotest* 2000; 6 (3): 267-291.
3. Kaźmierczak A. Computer simulation of the new ring seal coaction in combustion engine. *Industrial Lubrication and Tribology* 2004; 56 (4): 210-216.
4. Kaźmierczak A. Tarcie i zużycie zespołu tłok-pierścienie-cylinder. Wrocław: Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej 2005, 89 (32).
5. Kaźmierczak A. Physical aspects of wear of the piston-ring-cylinder set of combustion engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2008; 222: 2103-2119.
6. Koszałka G, Niewczas A. Wear profile of the cylinder liner in a motor truck diesel engine. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2007; 14 (4): 183-190.
7. Koszałka G. Application of the piston-rings-cylinder kit model in the evaluation of operational changes in blowby flow rate. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2010; 4: 72-81.

8. Koszałka G, Niewczas A, Pieniak D. Reliability assessment of a truck engine based on measurements of combustion chamber tightness. *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering 2012 Conference Proceedings, IEEE 2012*, pp. 995-999.
9. Kouremenos D A, Rakopoulos C D, Hountalas D T, Kouremenos A D. The maximum compression pressure position relative to top dead centre as an indication of engine cylinder condition and blowby. *Energy Conversion and Management* 1994; 35 (10): 857-870.
10. Lamaris V T, Hountalas D T. Validation of a diagnostic method for estimating the compression condition of direct injection diesel engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 2010; 224 (4): 517-532.
11. Lemski J. Modele zmian stanu technicznego. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2001; 1 (125): 193-210.
12. Merkiż J, Tomaszewski F, Ignatow O. *Trwałość i diagnostyka węzła tłokowego silników spalinowych*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1995.
13. Niewczas A. *Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego*. Warszawa: WNT, 1998.
14. Piekarski W. *Wybrane problemy diagnostyki ciągników rolniczych w aspekcie doskonalenia ich eksploatacji*. Lublin: Wydawnictwo Akademii Rolniczej, 1994.
15. Rakopoulos C D, Kosmadakis G M, Dimaratos A M, Pariotis E G. Investigating the effect of crevice flow on internal combustion engines using a new simple crevice model implemented in a CFD code. *Applied Energy* 2011; 88 (1): 111-126.
16. Serdecki W, Krzymień P. How the wear of cylinder liner affects the cooperation of piston-cylinder assembly of IC engine. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2012; 19 (1): 357-363.
17. Watzenig D, Steiner G, Sommer M S. Robust estimation of blow-by and compression ratio for large diesel engines based on cylinder pressure traces. *Instrumentation and Measurement Technology 2008 Conference Proceedings, IEEE 2008*, pp. 974-978.
18. Wolff A. Numerical analysis of piston ring pack operation. *Combustion Engines* 2009; 2: 128-141.