

dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski
Politechnika Poznańska

Diagnostyka WA silników spalinowych a8c22

W artykule przedstawiono wyniki wibroakustycznych (WA) badań diagnostycznych metodą eksperymentu czynno-biernego silników spalinowych a8c22. Badaniami objęto grupę silników, które zgodnie z założeniami metody planowo-zapobiegawczych napraw zostały skierowane do naprawy. Celem tych badań było znalezienie relacji pomiędzy parametrami sygnału drganiowego a wartościami wyznaczonych luzów par kinematycznych układu tłokowo-korbowego i rozrządu. Przeprowadzone badania korelacyjne oraz analizy regresyjne wykazały, że w przypadku złożonego obiektu jakim jest silnik spalinowy brak jest jednoznacznej odwzorowania pomiędzy parametrami sygnału a luzami.

Wprowadzenie

W badaniach diagnostycznych silników spalinowych a8c22 lokomotyw spalinowych serii SM42 zastosowano eksperyment diagnostyczny czynno-bierny [2]. Eksperyment ten polega na obserwacji (rejestracji) parametrów sygnału z równoczesnym pomiarem parametrów stanu obiektu dla jednej lub dwu jego wartości lub czasów eksploatacji bez ingerencji w wartości parametrów stanu. Jako jedną wartość stanu przyjmuje się najczęściej obiekty wyeksploatowane (przed naprawą), dla dwu wartości stanu przyjmuje się jako pierwszą wartość – stan obiektów nowych (przed rozpoczęciem eksploatacji), a drugą wartość – stan obiektów wyeksploatowanych (przed naprawą lub awarią).

W zrealizowanych badaniach dokonano pomiaru parametrów sygnału drganiowego oraz parametrów stanu (luzu) dla jednej wartości czasu eksploatacji Θ_k , tj. czasu przed wykonaniem planowej naprawy rewizyjnej silników. Badania te obejmowały pomiary sygnału drganiowego w charakterystycznych punktach na kadłubie silników oraz pomiary mikrometryczne elementów głównych układów silnika.

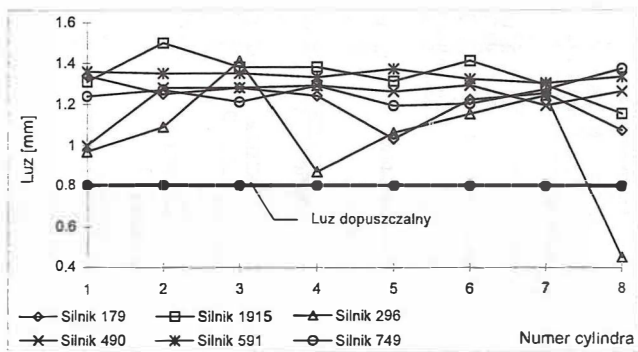
Zbiór cech $X(\Theta_k)$ opisujących stan elementów silnika

Zbiór cech opisujący stan silnika $X(\Theta_k) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ przyjęto jako wektor zawierający wartości wyznaczonych luzów x_n par kinematycznych głównych układów silnika. Wartości luzów wyznaczono na podstawie pomiarów współpracujących ze sobą elementów tworzących pary kinematyczne, przyjmując maksymalną wartość luzu.

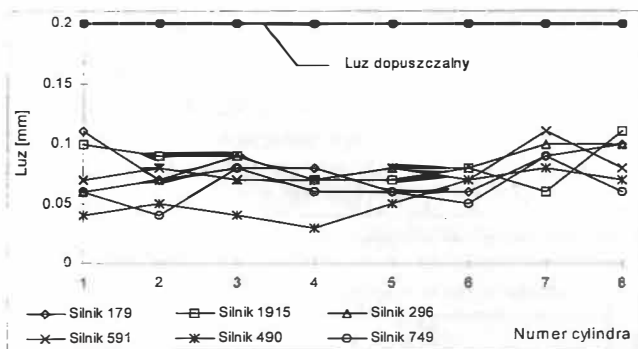
Na rysunkach 1–4 przedstawiono dla przykładowych wybranych par kinematycznych badanych silników wartości wyznaczonych luzów. Na rysunkach tych zaznaczono dla danej pary kinematycznej wartość dopuszczalnego luzu. Dla większości par kinematycznych badanych silników stwierdzono, że uzyskane w eksploatacji luzy nie przekroczyły wartości luzu dopuszczalnego. Wartość luzu dopuszczalnego przekroczona została dla następujących par kinematycznych:

- tłoka i tulei cylindrowej,
- łożysk głównych wału korbowego,
- łożysk korbowodowych.

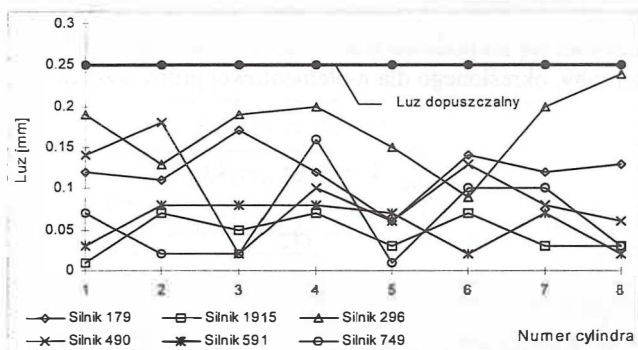
Luz dopuszczalny przekroczony został dla kilku łożysk wałka rozrządu oraz prowadnic zaworowych i dźwigni zaworów ssących.



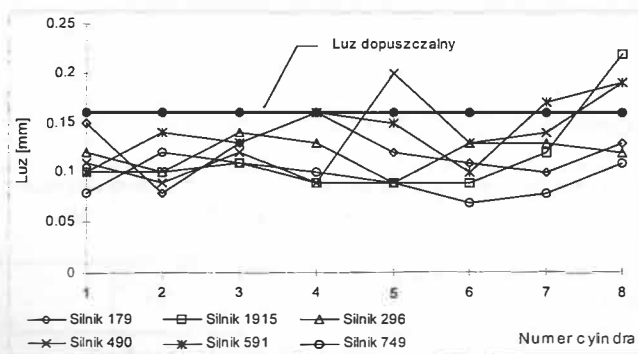
Rys. 1. Wartości luzów między tłokiem a tuleją badanych silników oraz luz dopuszczalny



Rys. 2. Wartości luzów popychacza zaworów w prowadnicy badanych silników oraz luz dopuszczalny



Rys. 3. Wartości luzów pierścienia uszczelniającego w rowku silników oraz luz dopuszczalny



Rys. 4. Wartości luzów trzonka zaworu ssącego w prowadnicy badanych silników oraz luz dopuszczalny

Zbiór parametrów wyjściowych $S(\Theta_k)$

Zbiór parametrów wyjściowych silnika $S(\Theta_k) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ jest wektorem zawierającym wartości pomierzonych parametrów sygnału drganiowego. Mierzonymi parametrami sygnału drganiowego były następujące wielkości:

- Ask – skuteczna wartość przyspieszeń drgań,
- Asz – szczytowa wartość przyspieszeń drgań,
- Vsk – skuteczna wartość prędkości drgań,
- Vsz – szczytowa wartość prędkości drgań,
- Ca – współczynnik szczytu dla przyspieszeń drgań,
- Cv – współczynnik szczytu dla prędkości drgań,
- fv – częstotliwość Rice'a prędkości drgań.

Jednocześnie oprócz wymienionych mierzonych parametrów punktowych sygnału drganiowego, dla skutecznej wartości przyspieszeń drgań wyznaczono tercjowe widmo amplitudowe oraz na jego podstawie gęstość widmową mocy. Widma te wyznaczono w przedziale od 10 do 100 Hz. Zakres analizy do 100 Hz jest wystarczający, gdyż pierwsza harmoniczna obrotowa wynosiła $f_0=13$ Hz.

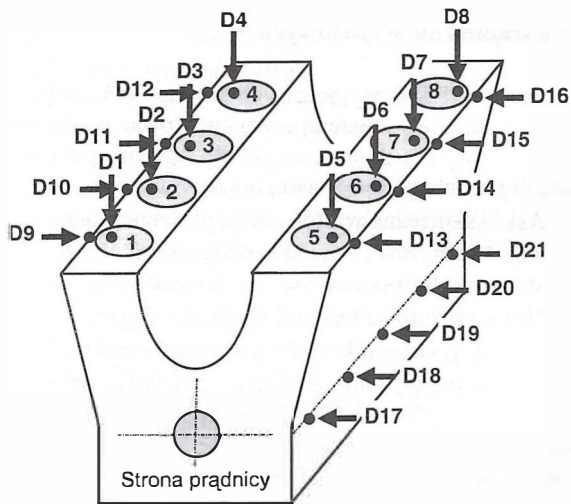
Wymienione parametry sygnału drganiowego mierzone były w trzech charakterystycznych miejscach na kadłubie silnika:

- na głowicach cylindrów, punkty pomiarowe D1 do D8,
- na wysokości zwrotów zewnętrznych tłoków (ZZ), punkty pomiarowe D9 do D16,
- na wysokości osi wału korbowego (na przeciw łożysk głównych wału), punkty pomiarowe D17 do D21.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na kadłubie silnika w trzech charakterystycznych miejscach pomiarowych. Strzałkami zaznaczono kierunek pomiaru drgań (przetworniki jednokierunkowe). Charakterystyczne miejsca pomiarowe na kadłubie silnika (głowice, zwrot zewnętrzny tłoków, oś wału korbowego), określono na drodze analizy niezawodnościowej oraz kinematycznej silnika.

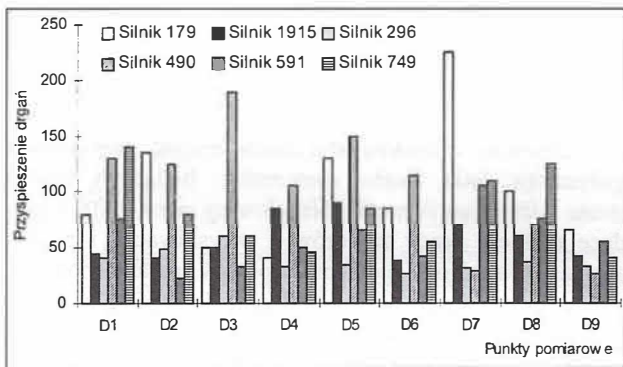
W obszarze charakterystycznych miejsc pomiarowych współpracuje duża liczba elementów, będących źródłem sygnału wibroakustycznego. Na głowicy występują drgania będące efektem pracy zaworów, wtryskiwacza i procesu spalania. Wymienione elementy i proces spalania posiadają charakter pracy impulsowy, pobudzając do drgań głowice. Na wysokości zwrotów zewnętrznych tłoków elementami generującymi drgania w tym obszarze są: tłok z tuleją, pierścienie tłokowe, pompy wtryskowe, popychacze zaworów i pomp wtryskowych. W związku z powyższym, mierzone drgania poprzeczne w tym miejscu będą efektem uderzeń tłoka o ściankę cylindra w wyniku zmiany jego kierunku ruchu, uderzeń mechanicznych i hydraulicznych w pompie wtryskowej oraz popychaczy. Na wysokości osi wału korbowego występują źródła drgań pochodzące od uderzeń w łożyskach wału korbowego i wałka rozrządu.

W wymienionych źródłach generowany sygnał wibroakustyczny będzie tym większy im większe uderzenia lub będą występować intensywne procesy tarcia (zużywania).

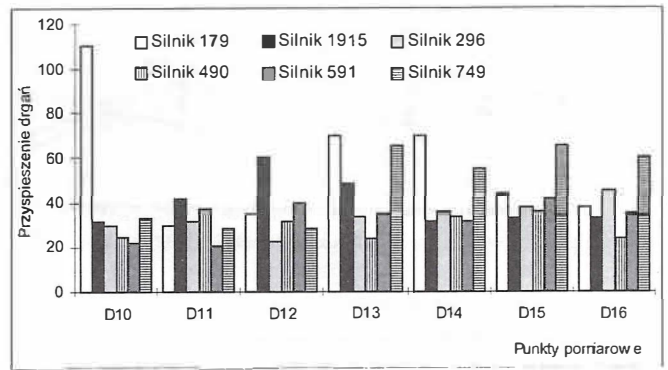


Rys. 5. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na kadłubie silnika a8c22. D1–D8 – punkty pomiarowe na głowicach, D9–D16 – punkty pomiarowe na wysokości zwrotu zewnętrznego, D17–D21 – punkty pomiarowe na wysokości osi wału korbowego na przeciwłożysk główne

Na rysunku 6 i 7 przedstawiono przykładowe zmierzone wartości przyspieszeń drgań w punktach pomiarowych na głowicach i zwrotach zewnętrznych (ZZ) tłoków. Zmierzone wartości przyspieszeń drgań wykazały, że ich poziom w poszczególnych punktach pomiarowych jest bardzo zróżnicowany. Podobny charakter mają wartości luzów zamierzonych na rysunkach 1–4. Można przypuszczać, że różnice w poziomach przyspieszeń drgań są wynikiem różnych wartości luzów w parach kinematycznych. Przedmiotem dalszej analizy będzie poszukiwanie związków między luzami a poziomem drgań.



Rys. 6. Wartości przyspieszeń drgań w punktach pomiarowych na głowicach badanych silników



Rys. 7. Wartości przyspieszeń drgań w punktach pomiarowych na wysokości ZZ badanych silników

Badanie relacji pomiędzy $X(\Theta_k)$ i $S(\Theta_k)$

Mając dany wektor parametrów wyjściowych (sygnałów) silnika $S(\Theta_k) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ oraz wektor stanu (cech) silnika $X(\Theta_k) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, czyli populację dwuwymiarową (S, X) , istotne jest czy i jak mocno skorelowane są zmienne losowe X i S [1]. Wnioskowanie statystyczne o współczynniku korelacji:

$$\rho = \frac{\text{cov}(S, X)}{\sigma_s \sigma_x} \quad (1)$$

gdzie: σ_s – wariancja zmiennych losowych S ,
 σ_x – wariancja zmiennych losowych X ,
 cov – kowariancja zmiennych losowych S i X ,

odbywa się na podstawie wartości współczynnika korelacji r z próby, określonego dla n -elementowej próby wzorem:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})(x_i - \bar{x})}{n \sigma_s \sigma_x} \quad (2)$$

Badania korelacyjne pomiędzy zmierzonymi parametrami sygnału drganiowego (punktowymi i poziomymi w pasmach widma przyspieszeń drgań) w wybranych punktach na kadłubie silnika a luzami par kinematycznych silnika pracujących w obszarze punktów pomiarowych, przeprowadzono według schematu przedstawionego w tabeli 1.

Tabela 1

Schemat badań korelacyjnych pomiędzy parametrami diagnostycznymi a luzami par kinematycznych silnika

Parametry sygnału drganiowego mierzone na głowicach D1 – D8	Parametry sygnału drganiowego mierzone na wysokości ZZ D9 – D16	Parametry sygnału drganiowego mierzone na wysokości osi wału D17 – D21
↕ Korelacja	↕ Korelacja	↕ Korelacja
Luz 1 zaworu ssącego w prowad. Luz 2 zaworu ssącego w prowad. Luz 1 zaworu wydech. w prowad. Luz 2 zaworu wydech. w prowad.	Luz tłoka w tulei cylindra Luz 1 pierścien. uszczel. w rowku Luz 2 pierścien. uszczel. w rowku Luz 3 pierścien. uszczel. w rowku	Luz łożysk głównych wału korb. Luz łożysk 1 wałka rozrządu Luz łożysk 2 wałka rozrządu

Luz dźwigni zaworów ssących Luz dźwigni zaworów wydech.	Luz 4 pierścien. uszczel. w rowku Luz pierścien. zgarn. w rowku Luz sworznia tłoka w tulejce korb. Luz łożysk korbowodowych Luz popych. zaworów ssących Luz popych. zaworów wydech. Luz popych. pompy wtryskowej	
--	--	--

Przykładowe wyniki obliczeń korelacyjnych pomiędzy parametrami sygnału drganiowego a luzami par kinematycznych jednego z badanych silników przedstawiono w tabeli 2 dla parametrów punktowych sygnału, oraz w tabelach 3 i 4 dla parametrów amplitudowych w dziedzinie częstotliwości

sygnału (widma amplitudowo-częstotliwościowego oraz gęstości widmowej mocy). Największe wartości współczynników korelacji uzyskano dla Asz i luzu łożysk wałka rozrządu oraz pasma 40 Hz i luzu łożysk głównych wału korbowego.

Tabela 2

Wartości współczynników korelacji pomiędzy parametrami punktowymi a luzami

Luzy par kinematycznych	Głowica						
	Ask	Asz	Vsk	Vsz	Ca	Cv	fv
Luz 1 zaworu ssącego w prowadnicy	-0,69	-0,75	-0,70	-0,56	—	0,71	—
Luz 2 zaworu ssącego w prowadnicy	—	—	-0,38	-0,37	—	—	—
Luz 1 zaworu wylotowego w prowadnicy	—	—	-0,42	-0,59	0,40	—	0,39
Luz 2 zaworu wylotowego w prowadnicy	0,39	—	—	—	-0,67	—	0,42
Luz dźwigni zaworów ssących	0,84	0,76	0,76	0,61	-0,70	-0,49	—
Luz dźwigni zaworów wylotowych	—	—	—	—	—	—	—
Luz łączny zaworów w prowadnicy	—	-0,33	-0,50	-0,64	—	—	0,51
Luz łączny dźwigni zaworów	0,73	0,73	0,61	0,55	—	—	0,47
Zwrot zewnętrzny							
Luz tłoka w tulei cylindra	—	—	0,51	0,56	—	—	-0,72
Luz 1 pierścienia uszczelniającego w rowku	0,47	0,47	0,63	0,55	—	-0,50	—
Luz 2 pierścienia uszczelniającego w rowku	—	—	—	—	0,36	—	—
Luz 3 pierścienia uszczelniającego w rowku	-0,45	-0,47	—	—	—	—	—
Luz 4 pierścienia uszczelniającego w rowku	—	—	0,44	0,57	—	—	-0,62
Luz pierścienia zgarniającego w rowku	—	—	0,50	0,51	—	—	-0,36
Luz sworznia w tulejce tłoka	—	—	—	—	0,33	—	—
Luz łożysk korbowodowych	-0,53	-0,57	-0,61	-0,69	-0,52	—	0,57
Luz popychacza zaworów ssących	—	—	—	—	-0,44	-0,64	0,44
Luz popychacza zaworów wylotowych	-0,39	-0,45	—	—	-0,44	-0,31	—
Luz popychacza pompy wtryskowej	—	—	—	—	—	0,51	—
Luz łączny pierścieni w rowku	—	—	0,46	0,51	0,37	—	0,45
Luz łączny popychacza	—	—	—	—	-0,38	-0,44	—
Wał korbowy/rozrządu							
Luz łożysk głównych wału korbowego	-0,57	-0,64	—	-0,52	0,34	0,34	0,61
Luz łożysk wału rozrządu 1-5	0,83	0,88	—	0,58	-0,64	—	-0,31
Luz łożysk wału rozrządu 6-10	—	0,31	0,60	—	—	-0,92	-0,71

Wartości współczynników korelacji pomiędzy poziomami w pasmach widma amplitudowo-częstotliwościowego a luzami

Luzy par kinematycznych	Częstotliwość pasm [Hz]										
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
	Głowica										
Luz 1 zaworu ssącego w prowadnicy	-0,70	-0,78	-0,75	-0,74	-0,43	-0,74	-0,78	-0,80	-0,76	-0,85	-0,82
Luz 2 zaworu ssącego w prowadnicy	—	-0,45	-0,43	-0,50	—	—	-0,40	-0,55	-0,51	-0,57	-0,48
Luz 1 zaworu wylotowego w prowadnicy	-0,42	—	—	—	-0,32	—	-0,26	-0,26	—	—	—
Luz 2 zaworu wylotowego w prowadnicy	—	—	—	—	—	—	—	—	0,41	—	—
Luz dźwigni zaworów ssących	—	—	—	—	0,48	0,58	—	—	0,56	—	0,47
Luz dźwigni zaworów wylotowych	0,67	0,45	0,57	0,34	—	0,38	0,55	0,40	—	0,39	0,36
Luz łączny zaworów w prowadnicy	-0,58	-0,50	-0,45	-0,44	—	—	-0,48	-0,46	-0,29	-0,45	-0,44
Luz łączny dźwigni zaworów	0,63	0,37	0,48	0,31	—	0,67	0,48	0,44	0,62	0,53	0,61
	Zwrot zewnętrzny										
Luz tłoka w tulei cylindra	—	—	—	-0,38	0,31	—	-0,40	—	—	—	—
Luz 1 pierścienia uszczelniającego w rowku	0,58	0,40	0,69	0,44	—	—	0,44	0,63	0,54	0,72	0,67
Luz 2 pierścienia uszczelniającego w rowku	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Luz 3 pierścienia uszczelniającego w rowku	-0,49	-0,77	-0,80	-0,85	—	—	-0,81	-0,57	-0,50	-0,34	-0,56
Luz 4 pierścienia uszczelniającego w rowku	—	—	—	-0,32	0,64	0,57	-0,45	—	—	—	—
Luz pierścienia zgarniającego w rowku	0,72	0,47	0,61	—	—	—	0,33	0,56	0,48	0,58	0,69
Luz sworznia w tulejce tłoka	—	—	—	-0,41	—	—	-0,40	—	—	—	—
Luz łożysk korbodowych	-0,48	-0,40	-0,46	-0,34	-0,71	-0,67	—	-0,51	-0,61	-0,56	-0,73
Luz popychacza zaworów ssących	—	—	—	—	-0,32	-0,33	—	—	—	—	—
Luz popychacza zaworów wylotowych	—	-0,31	—	-0,48	—	—	-0,53	-0,35	-0,39	—	—
Luz popychacza pompy wtryskowej	—	—	-0,33	—	0,54	0,46	-0,42	—	—	—	—
Luz łączny pierścieni w rowku	0,65	—	—	—	—	—	—	0,45	0,50	0,49	0,50
Luz łączny popychacza	—	—	—	-0,36	—	—	—	—	—	—	0,31
	Wał korbowy/rozzędu										
Luz łożysk głównych wału korbowego	—	—	-0,49	-0,52	0,50	0,44	0,88	0,72	0,72	0,43	—
Luz łożysk wału rozrzędu 1–5	—	—	-0,43	-0,55	—	—	-0,85	-0,78	-0,90	-0,70	—
Luz łożysk wału rozrzędu 6–10	—	-0,43	-0,34	—	-0,45	-0,45	—	—	-0,56	-0,53	-0,56

Wartości współczynników korelacji pomiędzy poziomami w pasmach widma gęstości mocy a luzami

Luzy par kinematycznych	Częstotliwość pasm [Hz]										
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
	Głowica										
Luz 1 zaworu ssącego w prowadnicy	-0,62	0,58	-0,72	-0,72	-0,44	-0,74	-0,73	-0,35	-0,77	-0,81	-0,83
Luz 2 zaworu ssącego w prowadnicy	—	—	-0,47	-0,55	-0,32	—	-0,46	—	-0,53	-0,58	-0,52
Luz 1 zaworu wylotowego w prowadnicy	-0,32	0,88	—	—	0,33	—	—	—	—	—	—
Luz 2 zaworu wylotowego w prowadnicy	—	—	—	—	—	—	—	0,45	0,38	—	—
Luz dźwigni zaworów ssących	—	-0,35	—	—	0,58	0,56	—	0,92	0,53	—	0,37
Luz dźwigni zaworów wylotowych	0,74	-0,42	0,44	—	—	-0,39	0,45	—	—	—	—
Luz łączny zaworów w prowadnicy	-0,49	-0,74	-0,47	-0,47	—	-0,38	-0,47	—	—	-0,43	-0,40
Luz łączny dźwigni zaworów	0,60	-0,57	—	—	—	0,69	—	0,42	0,47	0,33	0,46
Zwrot zewnętrzny											
Luz tłoka w tulei cylindra	—	-0,42	—	-0,51	—	—	-0,53	—	—	0,34	—
Luz 1 pierścienia uszczelniającego w rowku	0,68	0,34	0,67	0,36	—	—	0,34	0,69	0,55	0,70	0,72
Luz 2 pierścienia uszczelniającego w rowku	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Luz 3 pierścienia uszczelniającego w rowku	0,45	0,81	0,83	0,87	—	—	-0,84	-0,61	-0,47	—	-0,51
Luz 4 pierścienia uszczelniającego w rowku	—	—	—	-0,47	-0,55	-0,50	-0,57	—	—	—	—
Luz pierścienia zgarniającego w rowku	0,84	0,37	0,58	—	—	—	—	0,56	0,44	0,51	0,74
Luz sworznia w tulejce tłoka	—	—	-0,41	-0,47	—	—	-0,49	-0,34	—	—	—
Luz łożysk korbowodowych	-0,38	—	—	—	-0,70	-0,67	—	-0,47	-0,58	-0,54	-0,70
Luz popychacza zaworów ssących	0,34	—	—	—	-0,31	—	—	—	—	—	—
Luz popychacza zaworów wylotowych	—	-0,34	—	-0,51	—	—	-0,54	—	-0,38	—	—
Luz popychacza pompy wtryskowej	—	—	-0,45	-0,36	0,49	0,42	-0,47	-0,35	—	—	—
Luz łączny pierścieni w rowku	0,71	—	—	—	—	—	—	0,39	0,45	0,40	0,53
Luz łączny popychacza	—	—	—	-0,44	—	—	-0,41	—	—	—	0,31
Wał korbowy/rozzędu											
Luz łożysk głównych wału korbowego	—	—	-0,46	-0,53	-0,46	0,38	0,92	0,77	0,80	0,41	—
Luz łożysk wału rozrzędu 1-5	—	—	0,36	0,50	—	—	-0,90	-0,83	-0,96	-0,69	—
Luz łożysk wału rozrzędu 6-10	—	-0,42	-0,34	—	-0,42	-0,39	—	—	-0,56	-0,52	-0,54

W przykładowych tabelach 2–4 zamieszczono tylko wartości współczynników korelacji dla których $r > 0,30$. Wartość współczynnika $r \leq 0,30$ świadczy o słabym związku pomiędzy badanymi cechami [2]. Kryteria podziału siły związku pomiędzy dwiema cechami są następujące:

- $r \leq 0,30$ – związek słaby,
- $r = 0,31 \div 0,50$ – związek umiarkowany,
- $r = 0,51 \div 0,70$ – związek znaczny,
- $r = 0,71 \div 0,90$ – związek ścisły,
- $r > 0,90$ – związek bardzo ścisły.

W dwuwymiarowym rozkładzie (S, X) bardzo ważnym narzędziem, oprócz badań korelacyjnych, jest badanie kształtu zależności istniejącej między zmiennymi losowymi S i X za pomocą funkcji regresji jednej zmiennej względem drugiej. W niniejszej pracy do badania kształtu zależności istniejącej między zmiennymi losowymi S i X zastosowano funkcję regresji II rodzaju, wyznaczoną metodą najmniejszych kwadratów w oparciu o próbę losową uzyskaną z badań [1].

Analiza regresji dokonuje opisu przebiegu badanych współzależności, dzięki czemu pozwala na prognozowanie zmian wartości luzów w zależności od zmian parametru sygnału. Regresja prowadzi więc do uogólnienia badanego zjawiska.

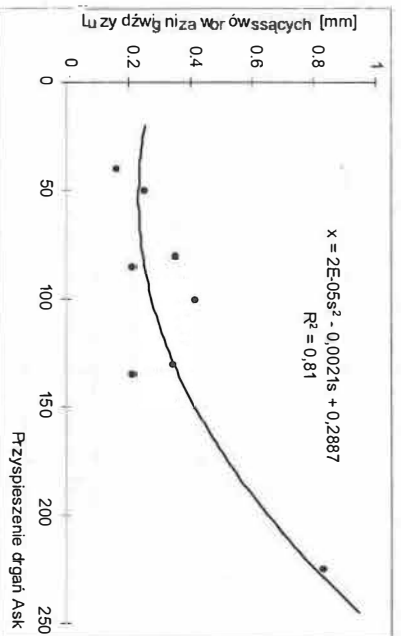
Analizę regresji przeprowadzono dla tych parametrów sygnału oraz luzu pary kinematycznej, dla których uzyskano największe wartości współczynnika korelacji oraz dla luzów łącznych par kinematycznych (wartość średnia luzu dla takich samych elementów silnika).

W analizie regresji uwzględniono następujące modele regresji:

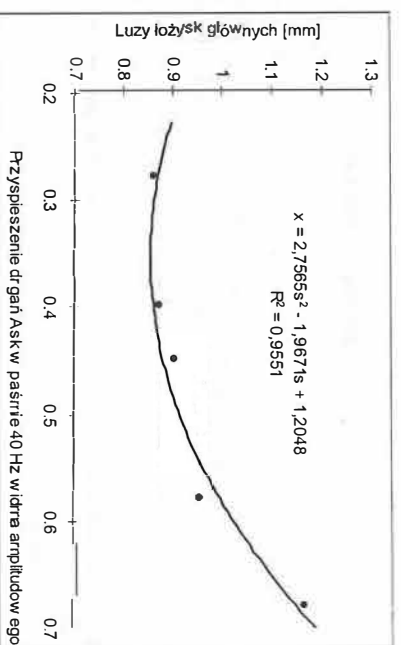
- liniowy,
- wykładniczy,
- potęgowy,
- logarytmiczny,
- wielomianowy 2 stopnia.

Dla każdego modelu wyznaczono równanie opisujące zależność wartości luzu X od wartości parametru sygnału S oraz współczynnik determinacji R^2 .

Na rysunku 8 oraz 9 przedstawiono wyznaczone równania regresji oraz współczynniki determinacji R^2 dla luzów dzwigni zaworów dolotowych od skutecznej wartości przyspieszeń drgań (Ask) oraz luzu łożysk głównych wału korbowego od poziomu przyspieszeń drgań w paśmie 40 Hz widma amplitudowego.



Rys. 8. Krzywa regresji opisująca zależność luzu dzwigni zaworów ssących od skutecznej wartości przyspieszeń drgań



Rys. 9. Krzywa regresji opisująca zależność luzu łożysk głównych wału korbowego od skutecznej wartości przyspieszeń drgań w paśmie 40 Hz widma amplitudowego

W pierwszym przykładzie zależność luzu dzwigni zaworów ssących od skutecznej wartości przyspieszeń drgań Ask opisana jest za pomocą modelu wielomianowego drugiego stopnia przy współczynniku determinacji $R^2 = 0,81$. W drugim przykładzie zależność luzu łożysk głównych od przyspieszeń drgań w paśmie 40 Hz opisana jest też za pomocą modelu wielomianu drugiego stopnia przy współczynniku determinacji $R^2 = 0,95$.

Przykładowe wyniki obliczeń regresji z wyznaczonymi wartościami determinacji R^2 dla luzów łącznych badanych silników przedstawiono w tabeli 5. Jak łatwo zauważyć uzyskane wartości współczynników determinacji nie są duże. Małe wartości współczynników determinacji świadczą o małym związku wartości pomierzonych parametrów sygnału drganiowego z wartościami luzów par kinematycznych silników. Najlepszy związek (największe wartości współczynnika determinacji) uzyskano dla tych par kinematycznych, które przekroczyły wartości dopuszczalne. Ponieważ większość luzów par kinematycznych silników nie przekroczyła wartości dopuszczalnej, stąd słaby związek i małe wartości współczynników determinacji.

Wartości współczynników determinacji uzyskane dla poszczególnych parametrów punktowych sygnału drganiowego i modeli regresyjnych

Parametr sygnału	Model	Luz zaworów w prowadnicach	Luz czopa w tulejce dźwigni zaworowych	Luz pierścieni w rowkach tłoka	Luz popychaczy w prowadnicach
Ask	liniowy	0,072	0,538	0,068	0,080
	logarytmiczny	0,204	0,643	0,128	0,068
	wielomianowy	0,534	0,655	0,388	0,080
	potęgowy	0,188	0,707	0,134	0,068
	wykładniczy	0,063	0,545	0,076	0,078
Asz	liniowy	0,110	0,531	0,115	0,108
	logarytmiczny	0,225	0,596	0,181	0,099
	wielomianowy	0,567	0,594	0,451	0,108
	potęgowy	0,212	0,645	0,191	0,098
	wykładniczy	0,100	0,537	0,126	0,106
Vsk	liniowy	0,239	0,381	0,194	0,0001
	logarytmiczny	0,358	0,443	0,286	0,0541
	wielomianowy	0,604	0,419	0,545	0,059
	potęgowy	0,349	0,542	0,316	0,045
	wykładniczy	0,232	0,447	0,213	0,00002
Vsz	liniowy	0,384	0,310	0,244	0,003
	logarytmiczny	0,408	0,414	0,260	0,092
	wielomianowy	0,404	0,572	0,335	0,190
	potęgowy	0,403	0,542	0,293	0,079
	wykładniczy	0,386	0,415	0,271	0,001
Ca	liniowy	0,012	0,343	0,135	0,178
	logarytmiczny	0,005	0,339	0,136	0,193
	wielomianowy	0,791	0,353	0,139	0,382
	potęgowy	0,002	0,430	0,158	0,174
	wykładniczy	0,006	0,442	0,156	0,160
Cv	liniowy	0,012	0,091	0,033	0,063
	logarytmiczny	0,009	0,116	0,030	0,084
	wielomianowy	0,036	0,344	0,039	0,283
	potęgowy	0,007	0,088	0,024	0,080
	wykładniczy	0,009	0,066	0,026	0,0058
fv	liniowy	0,250	0,214	0,193	0,128
	logarytmiczny	0,255	0,172	0,226	0,020
	wielomianowy	0,257	0,553	0,222	0,608
	potęgowy	0,291	0,094	0,256	0,013
	wykładniczy	0,287	0,127	0,226	0,107

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania oraz analizy korelacyjne i regresyjne związane z badaniami diagnostycznymi silników spalinowych a8c22 z zastosowaniem eksperymentu czynno-biernego pozwalają sformułować następujące wnioski:

- poszczególne elementy układu tłokowo-korbowego oraz rozrządu nie zużywają się z taką samą intensywnością, tzn. nie wszystkie elementy przekroczyły wartości dopuszczalne luzów,

- wartości luzów tych samych par kinematycznych w badanych silnikach są podobne, co świadczy o jednokowej intensywności ich zużywania się,
- pomierzone wartości parametrów sygnału wykazują znaczne różnice pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi,

- w badaniach korelacyjnych stwierdzono bardzo niskie wartości współczynników korelacji pomiędzy wartościami luzów a parametrami sygnału,
- odwzorowanie wartości luzów par kinematycznych w parametrach sygnału wibroakustycznego stwierdzono dla tych luzów par kinematycznych, które osiągnęły względnie przekroczyły wartości dopuszczalne,
- najlepszym modelem opisującym zależność luzu par kinematycznych od wartości parametrów sygnału jest model wielomianowy,
- w złożonym obiekcie mechanicznym, jakim jest silnik spalinowy, niemożliwe jest wyznaczenie luzów

wszystkich par kinematycznych na podstawie parametrów sygnału wibroakustycznego w przypadku małej ich wartości.

Literatura

- [1] *Greń J., Statystyka matematyczna. PWN, Warszawa 1987.*
- [2] *Tomaszewski F., Zagadnienia metodyczne projektowania badań diagnostycznych spalinowych pojazdów szynowych. Pojazdy Szynowe, Nr 2, 2000, str. 53-61.*