

Jarosław KOBRYŃ, Krystian WILK

ANALIZA MOŻLIWOŚCI OKREŚLENIA KRYTERIÓW PODOBIENSTWA WSPÓLCZEŚNIE PRODUKOWANYCH SAMOCHODOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH ZS I ZI

Streszczenie. W pracy zaproponowano sposób analizy współcześnie produkowanych samochodowych silników spalinowych ZS i ZI przy wykorzystaniu kryteriów podobieństwa. Badania przeprowadzono w oparciu o znane liczby podobieństwa oraz nowe, utworzone i zastosowane do celów tej analizy.

ANALYSYS OF A POSSIBILITY TO ESTIMATE SIMILARITY CRITERIA IN MODERN DIESEL AND S.I. ENGINES

Summary. The paper proposes a way of analysing modern diesel and spark ignition car engines, making use of similarity criteria. The research was made on the basis of similarity numbers known in practice and new ones created and applied in this analysis.

Oznaczenia

- A_{sr} – średnie pole poprzecznego przekroju swobodnego przepływu przez szczelinę zaworu dolotowego [m^2],
 D – średnica cylindra [m],
 d_a, d_c – średnice gniazda zaworu dolotowego [m],
 d_o – zastępcza średnica [m],
 Fr – liczba Froude'a [-],
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
 G_{aN} – masa strumienia powietrza dla mocy maksymalnej [kg/s],
 G_{eN} – masa strumienia paliwa dla mocy maksymalnej [kg/s],
 h – wznios zaworu [m],
 Ho – liczba Strouhala [-],
 i_o – pełna (chemiczna i fizyczna) entalpia właściwa [J/kg],
 K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – liczby kryterialne podobieństwa [-],
 L – skok tłoka [m],
 m – stosunek mas strumieni [-],
 M_{max} – moment maksymalny [Nm],
 n_N – prędkość obrotowa dla mocy maksymalnej [s^{-1}],
 n_M – prędkość obrotowa dla momentu maksymalnego [s^{-1}],

N_{max} – moc maksymalna [W],
 V_{ss} – objętość skokowa silnika [m³],
 w_a – prędkość wypływu powietrza [m/s],
 $w_{oś}$ – średnia prędkość przepływu powietrza przepływającego przez zawór dolotowy [m/s],
 w_g – prędkość wypływu paliwa [m/s],
 w_o – prędkość wypływu [m/s],
 W_d – wartość opałowa paliwa [J/kg],
 α – kąt przyłgni zaworu [°],
 η_{efo} – efektywny współczynnik lepkości [kg/(ms)],
 η_e – sprawność efektywna [-],
 ρ_o – gęstość [kg/m³],
 ρ_m – gęstość mieszanki [kg/m³],
 τ – czas [s].

1. WPROWADZENIE

Dane konstrukcyjne i eksploatacyjne większości silników obecnie produkowanych są trudno dostępne. Przedstawiciele handlowi i stacje obsługowo – naprawcze dysponują bardzo ograniczonymi danymi: wykresy mocy i momentu obrotowego, pojemność skokowa, liczba cylindrów, średnica cylindra, skok tłoka, stopień sprężania. Wartości takich wielkości, jak wykres jednostkowego zużycia paliwa, skok zaworu, jego średnica, czy nawet czasookresy otwarcia i zamknięcia zaworów, są bardzo trudno dostępne.

Liczba parametrów mogących posłużyć do analizy metodą podobieństwa jest znacznie ograniczona. Bezwymiarowe kombinacje wielkości fizycznych opisujących badane zjawisko nazywa się liczbami kryterialnymi. Teoria podobieństwa wskazuje, że w celu uzyskania zmian wartości tych liczb kryterialnych można zmieniać wartości dowolnych wielkości tworzących te liczby i nie powinno to mieć wpływu na końcowy wynik.

2. LICZBY KRYTERIALNE PODOBIENSTWA

W analizie wzięto pod uwagę liczby podobieństwa ogólnie znane (Ho , Fr , η_e), badane wcześniej przez autorów (K_1 , K_2) oraz nowe liczby utworzone na potrzeby tej analizy (K_3 , K_4 , K_5).

Liczba K_1 [1,4] jest tzw. efektywną liczbą Reynoldsa. Zawiera ona informacje o wymiarach komory spalania, o rodzaju paliwa oraz o wielkości pól przekrojów wylotowych, czyli o najistotniejszych cechach konstrukcyjnych komory spalania.

$$K_1 = \frac{\rho_o w_o d_o}{\eta_{efo}} \quad (1)$$

Liczba K_2 [1,4] charakteryzuje stosunek energii kinetycznej do pełnej entalpii strugi. Zawiera dane o wartości opałowej paliwa, o stopniu podgrzania i prędkościach wypływu substratów.

$$K_2 = \frac{w_o^2}{i_o} \quad (2)$$

gdzie:

- gęstość ρ_o

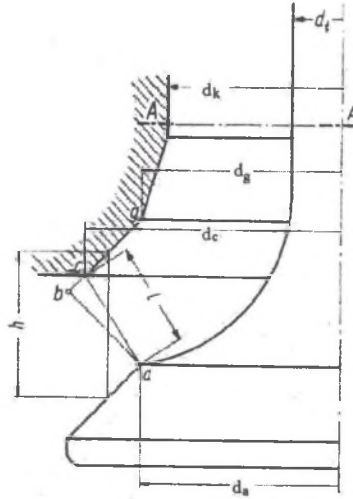
$$\rho_o = 2 * \frac{G_{aN} + G_{eN}}{n_N * V_{ss}} \quad (3)$$

- prędkość wypływu w_o

$$w_o = \frac{G_{aN} + G_{eN}}{A_{sr} \rho_m} \quad (4)$$

Przyjęto, że średnie pole przepływu dla całego cyklu występuje przy połowie maksymalnego wzniosu zaworu:

$$A_{sr} = \frac{\pi(d_a + d_c)}{2} \sqrt{\left(\frac{h}{2} - \frac{d_c - d_a}{2 \operatorname{tg} \alpha}\right)^2 + \left(\frac{d_c - d_a}{2}\right)^2} \quad (5)$$



Rys. 1. Swobodne pole przepływu między gniazdem a grzybkim zaworu
Fig. 1. Free float area at valve opening

- zastępcza średnica d_o

$$d_o = 2 * \sqrt{\frac{G_{aN} + G_{eN}}{\pi \rho_o w_o}} \quad (6)$$

- pełna (chemiczna i fizyczna) entalpia właściwa i_o

$$i_o = \frac{W_d}{1 + m} \quad (7)$$

gdzie:

$$m = \frac{G_{aN}}{G_{eN}} \quad (8)$$

- efektywny współczynnik lepkości η_{efo}

$$\eta_{efo} = 0,012 D^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}} \rho_o^{\frac{2}{3}} (G_{eN} w_k^2 + G_{aN} w_o^2)^{\frac{1}{5}} \quad (9)$$

W oparciu o liczbę współczesności Ho , zwaną również liczbą Strouhala Str , wykorzystującą parametr czasu, wyznaczono liczbę K_3 zawierającą dane konstrukcyjne silnika i informację o rodzaju paliwa:

$$K_3 = \frac{Ho}{K_2} = \frac{i_o}{d_o n_N w_o} \quad (10)$$

Przyjęto postać liczby Ho jako:

$$Ho = \frac{w_o \tau}{d_o} = \frac{w_o}{d_o n_N} \quad (11)$$

gdzie: $\tau = 1/n_N$.

Użyto również znanej liczby Froude'a Fr wykorzystującej stałą w warunkach ziemskich wartość g :

$$K_4 = Fr * K_2 = \frac{gd_o}{i_e} \quad (12)$$

Postać liczby Fr przyjęto jako:

$$Fr = \frac{gd_o}{w_o^2} \quad (13)$$

W literaturze można też spotkać odwrotną postać liczby Fr . Liczba K_4 również zawiera dane o wartości opałowej paliwa i prędkościach wypływu substratów.

Przeanalizowano również sprawność efektywną, spełniającą warunek bezwymiarowości liczby kryterialnej:

$$\eta_e = \frac{N_{\max}}{G_{eN} W_d} \quad (14)$$

Wielkość ta zawiera informacje o stopniu wykorzystania energii zawartej w paliwie na pracę efektywną.

W celu porównania danych katalogowych spalinowych silników samochodowych utworzono liczbę K_5 jako:

$$K_5 = \frac{n_N}{N_{\max}} * \frac{M_{\max}}{n_M} \sqrt{\frac{DL}{V_{ss}}} * g \quad (15)$$

Liczba zawiera informacje o wielkościach charakteryzujących osiągi silnika, jak też o cechach konstrukcyjnych komory spalania, wykorzystując wielkość stałą przyspieszenia ziemskiego.

3. OBIEKTY ANALIZY

Do analizy wykorzystano silniki pojazdów współcześnie produkowanych, opierając się na danych katalogowych udostępnionych przez producenta. Większość samochodów osobowych wyposażonych jest w silniki benzynowe. Samochody z silnikami ZS są droższe, stąd mniejsza różnorodność pojazdów mogących posłużyć do analizy.

Silniki ZI:

- Volvo 460GL,
- Opel Astra 2,0i 16V,
- Renault Laguna 1,8,
- Fiat Doblo 1,2 8V,
- Fiat Doblo 1,6 16V,
- Mercedes C240,
- Kia Magnetis 2,0,
- Kia Magnetis 2,4,
- Kia Rio 1,3,
- Kia Rio 1,5,
- Kia Sephia 1,6,
- Kia Opirus 3,5,
- Kia Carens 2,0,
- BMW 530i.

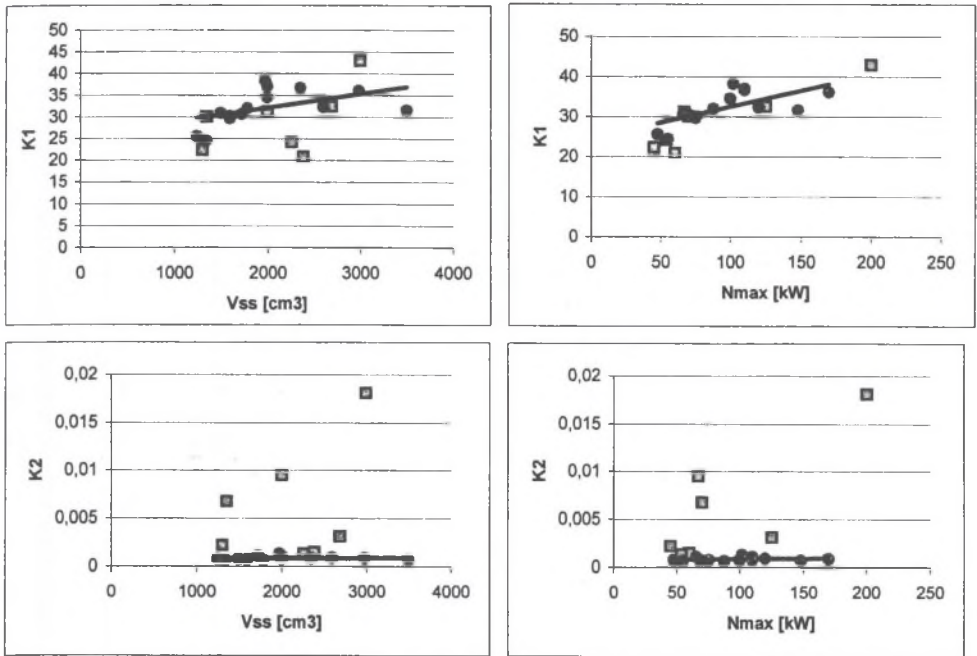
Silniki ZS:

- Fiat Doblo 1,3 JTD,
- Peugeot 307 2.0 HDI,
- BMW 535d Saloon,
- Volvo 740 GL 2.4 D,
- Opel Omega 2,3 D,
- Fiat Uno D,
- Mercedes C270 CDI.

Przydatność liczb podobieństwa badano w zależności od objętości skokowej silnika i mocy maksymalnej.

Liczba K_1 dla ZI przyjmowała wartości z zakresu 24-38 i wykazywała wzrost wartości ze wzrostem V_{ss} i N_{max} . Dla samochodów z silnikami ZS przyjmowała wartości w dużo większym zakresie 20-43, trudno określić trend zależności od V_{ss} , liczba ta wykazywała wzrost wartości wraz ze wzrostem wartości N_{max} .

Liczba K_2 dla ZI przyjmowała głównie wartości z zakresu 0,0006-0,0013 i wykazywała raczej stałą tendencję w zależności od V_{ss} i N_{max} . Dla ZS przyjmowała wartości od 0,0013 do 0,0181, trudno również określić trend zależności od V_{ss} i N_{max} .



Rys. 2. Uzyskane zależności liczb K_1 i K_2 od objętości skokowej silnika V_{ss} i maksymalnej mocy N_{max} :
 ● - ZI, □ - ZS, linia - trend ZI

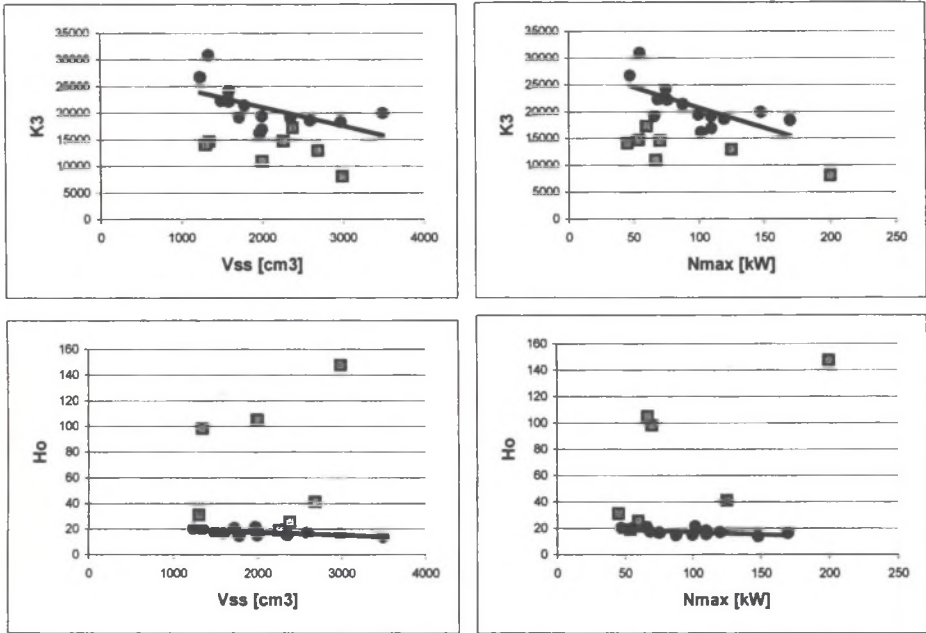
Fig. 2. Results of dependence of numbers K_1 and K_2 upon engine displacement volume V_{ss} and maximum power N_{max} : ● - S.I., □ - DI, line - S.I. trend

Liczba K_3 dla ZI przyjmowała wartości z zakresu 16223-30970 i wykazywała zmniejszenie wartości ze wzrostem V_{ss} i N_{max} . Dla samochodów z silnikami ZS przyjmowała wartości w zakresie 8153-17280, trudno określić trend zależności od V_{ss} i N_{max} .

Liczba H_0 dla ZI przyjmowała wartości z zakresu 13-30 i wykazywała stałą tendencję wartości ze wzrostem V_{ss} i N_{max} . Dla samochodów z silnikami ZS przyjmowała wartości w dużo większym zakresie 19-147, trudno określić trend zależności od V_{ss} i N_{max} .

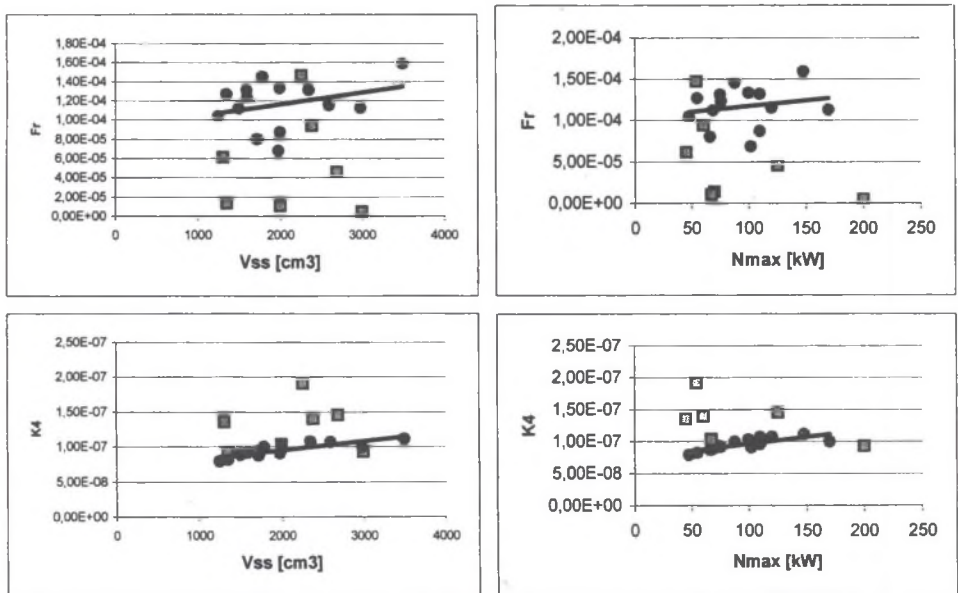
Liczba K_4 dla ZI przyjmowała wartości z zakresu 7,9E-08 - 11E-08 i wykazywała znaczne zwiększenie wartości ze wzrostem V_{ss} i N_{max} . Dla samochodów z silnikami ZS przyjmowała wartości w zakresie 9,3E-08 - 12E-08, trudno określić trend zależności od V_{ss} i N_{max} .

Liczba Fr dla ZI przyjmowała wartości z zakresu 6,8E-05 - 16E-05 i trudno określić tendencję ze wzrostem V_{ss} i N_{max} . Dla samochodów z silnikami ZS przyjmowała wartości w dużo większym zakresie 0,5E-05 - 14E-05, trudno również określić trend zależności od V_{ss} i N_{max} .



Rys. 3. Uzyskane zależności liczb K_3 i H_o od objętości skokowej silnika V_{ss} i maksymalnej mocy N_{max} :
 ● - ZI, □ - ZS, linia - trend ZI

Fig. 3. Results of dependence of numbers K_3 and H_o upon engine displacement volume V_{ss} and maximum power N_{max} : ● - S.I., □ - DI, line - S.I. trend

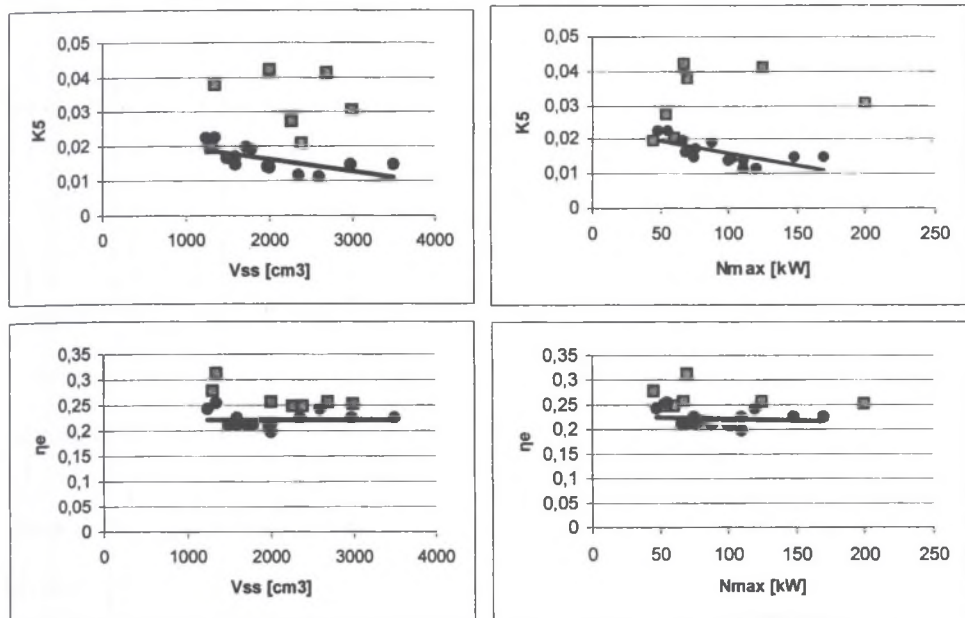


Rys. 4. Uzyskane zależności liczb Fr i K_4 od objętości skokowej silnika V_{ss} i maksymalnej mocy N_{max} :
 ● - ZI, □ - ZS, linia - trend ZI

Fig. 4. Results of dependence of numbers Fr and K_4 upon engine displacement volume V_{ss} and maximum power N_{max} : ● - S.I., □ - DI, line - S.I. trend

Liczba K_5 dla ZI przyjmowała wartości z zakresu 0,011-0,022 i wykazywała zmniejszenie wartości ze wzrostem V_{ss} i N_{max} . Dla samochodów z silnikami ZS przyjmowała wartości w zakresie 0,019-0,042, trudno określić trend zależności od V_{ss} i N_{max} .

Liczba η_e dla ZI przyjmowała wartości z zakresu 0,19-0,25 i znacznie wykazywała stałą tendencję wartości ze wzrostem V_{ss} i N_{max} . Dla samochodów z silnikami ZS przyjmowała wartości w dużo większym zakresie 0,24-0,31 i również wykazywała stałą tendencję ze wzrostem V_{ss} i N_{max} .



Rys. 5. Uzyskane zależności liczb K_5 i η_e od objętości skokowej silnika V_{ss} i maksymalnej mocy N_{max} :
 ● - ZI, □ - ZS, linia - trend ZI

Fig. 5. Results of dependence of numbers K_5 and η_e upon engine displacement volume V_{ss} and maximum power N_{max} : ● - S.I., □ - DI, line - S.I. trend

4. PODSUMOWANIE

- Liczby kryterialne przebadanych silników ZI wykazują znaczną zależność od objętości skokowej silnika i mocy maksymalnej. Liczby K_1 , K_4 rosną, liczby K_3 , K_5 maleją, a liczby K_2 , H_0 , η_e wykazują wartość stałą, trudno określić zmienność liczby Fr w zależności od V_{ss} i N_{max} .
- W przypadku przebadanych silników ZS analiza jest dużo trudniejsza. Zaobserwowano tylko wzrost wartości liczby K_1 w zależności od N_{max} , i stałą wartość η_e w zależności od N_{max} i V_{ss} . Aby dokładnie określić tendencje pozostałych liczb podobieństwa, należałoby przebadać większą liczbę silników ZS.
- Liczba K_4 wykazuje lepszą zależność od V_{ss} i N_{max} niż liczba Fr , z której została utworzona.

- Przypuszcza się, że analiza tych liczb pozwoli na wnioskowanie o wielkości parametrów innego silnika spalinowego bez konieczności przeprowadzania kosztownych badań na hamowni silnikowej.

Literatura

1. Wilk K.: Badania dyfuzyjnych palników gazowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Energetyka nr 785, Gliwice 1984.
2. Szargut J.: Termodynamika techniczna. PWN, Warszawa 1991.
3. Kowalewicz A.: Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych. WKiŁ, Warszawa 1980.
4. Kobryń J., Wilk K.: Use of theory of similarity in dependence analysis of air-fuel ratio mean temperature and boundary conditions in diesel turbo engine. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2006.
5. Müller L., Wilk A.: Teoria podobieństwa w badaniach modeli fizycznych i matematycznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
6. Depussay E., Mounaïm-Rousselle C., Burnel S.: A probe to estimate the local fuel concentration in spark ignition engines: design and validation study of catalytic hot wire probe. Flow Measurement and Instrumentation 12. Elsevier Science LTD 2001.
7. Selamet E., Selamet A., Novak J.: Predicting chemical species in spark – ignition engines. Energy 29, 2004.
8. Chan S., Zhu J.: Modelling of engine in – cylinder thermodynamic under high values of ignition retard. Int. J. Therm. Sci. 40, 2001.

Recenzent: Dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak, prof. ATH

Artykuł stanowi sprawozdanie z BW-418/RT1/2006