

## PRÓBA ZASTOSOWANIA ANALIZY FALKOWEJ DO OCENY WSKAŹNIKÓW CYKLU PRACY SILNIKA O ZS

Andrzej AMBROZIK, Dariusz KURCZYŃSKI, Piotr ŁAGOWSKI

Zakład Silników Spalinowych i Maszyn Roboczych, Katedra Pojazdów i Sprzętu Mechanicznego, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, PL-25314 Kielce, fax: (041)34 24 340, email: silspal@tu.kielce.pl

Tomasz AMBROZIK

Zakład Elektroniki, Wyższa Szkoła Telekomunikacji i Informatyki w Kielcach, ul. Helenówek 2, fax: (041) 34 60 802, email: tambrozik@wp.pl

### Streszczenie

W artykule podjęto próbę zastosowania prostych równań analizy falkowej do oceny wskaźników cyklu pracy silnika o zapłonie samoczynnym. Analizie poddano wykresy indykatorowe silnika AD3.152 pracującego wg zewnętrznej charakterystyki prędkościowej dla prędkości obrotowej odpowiadającej maksymalnemu momentowi obrotowemu  $n=1400$  obr/min i prędkości mocy nominalnej  $n=2000$  obr/min. W pracy przedstawiono rzeczywiste wykresy indykatorowe i po odfiltrowaniu zakłóceń. W artykule omówiono wpływ odfiltrowania przebiegu ciśnienia w cylindrze na charakterystyki wydzielania ciepła podczas procesu spalania.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, diagnostyka, wykres indykatorowy, wydzielanie ciepła, analiza falkowa

### ATTEMPT AT WAVELET ANALYSIS APPLICATION TO THE ASSESSMENT OF SELF-IGNITION ENGINE WORKING CYCLE INDICATORS

#### Summary

The paper makes an attempt at applying simple equations of wavelet analysis to the assessment of self-ignition engine working cycle indicators. AD3.152 engine indicator diagrams are analysed. The engine operated in external speed characteristics regime for the rotational speed corresponding to the maximum torque  $n=1400$  rotations/min and power rating speed  $n=2000$  rotations/min. Both real indicator diagrams and those obtained after interference filtration are presented in the paper. The impact of the filtration of pressure changes in the cylinder on heat release characteristics in combustion process is discussed

Keywords: combustion engines, diagnostics, indicator diagram, heat release, wavelet analysis

## 1. WSTĘP

Wykres indykatorowy jest jednym z dość łatwo uzyskiwanych i wiarygodnych źródeł informacji o przebiegu procesów zachodzących wewnątrz cylindra silnika spalinowego. Od przebiegu tego procesu silnie zależy emisja toksycznych składników spalin, która coraz ostrzej regulowana jest przez przepisy normatywne [1]. Wszystko to powoduje konieczność posiadania dokładnych i szybkich metod obliczeniowych, dzięki którym możliwa jest ocena stanu technicznego silnika.

Dość szybko rozwijającą się dziedziną w zakresie analizy wykresów indykatorowych jest falkowa analiza sygnałów. Jest to dziedzina dość młoda gdyż liczy sobie zaledwie 10 lat. Znajduje ona szerokie zastosowanie wszędzie tam, gdzie dokonywana jest analiza procesów przejściowych

reprezentowanych przez sygnały będące wynikiem zmienności w czasie nieliniowych parametrów charakteryzujących analizowane zjawiska fizyczne [2]. Wykorzystuje się ją m. in. do filtracji sygnałów i kompresji danych, jak również w obliczeniach numerycznych. Pozwala to na znaczne przyspieszenie w czasie realizacji obliczeń.

Reasumując, analizę falkową stosujemy do aproksymacji badanego zjawiska fizycznego, co umożliwia uwypuklenie istotnych charakterystyk danego zjawiska jak np. przebiegu procesu spalania w tłokowym silniku spalinowym, co postanowiono między innymi wykorzystać w niniejszym artykule.

## 2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest próba zastosowania najprostszej analizy falkowej, wykresu indyktorowego. Niniejsza analiza ma na celu porównanie wartości wskaźników pracy silnika wyznaczonych w oparciu o rzeczywisty wykres indyktorowy, z wartościami tych wskaźników uzyskanych z wygładzonego wykresu indyktorowego sporządzonego zarówno dla otwartego jak i zamkniętego układu termodynamicznego.

## 3. METODYKA BADAŃ

Od postaci wykresu indyktorowego zależy szereg ważnych wskaźników i parametrów pracy silnika. Przebiegi ciśnienia (wykresy indyktorowe) należą do wielkości szybkozmiennych obciążonych zakłóceniami [3]. Dlatego też w pracy podjęto próbę zastosowania najprostszego filtra dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego do analizy takiego wykresu. Równanie najprostszego filtra dolnoprzepustowego wg [2] ma postać:

$$p_{sri} = \frac{1}{2}p_i + \frac{1}{2}p_{i-1} \quad (1)$$

gdzie:  $p_i$  jest bieżącą wartością ciśnienia w cylindrze.

Wyjściem tego filtra jest wartość średnia z dwóch ostatnich wartości sygnału wejściowego, to znaczy generuje on tzw. średnią bieżącą. Filtrzem bliźniaczym tego filtra jest filtr górnoprzepustowy, który generuje różnicę bieżącą z dwóch ostatnich wartości sygnału wejściowego i ma on postać [2]:

$$p_{ri} = \frac{1}{2}p_i - \frac{1}{2}p_{i-1} \quad (2)$$

Do analizy wykorzystano wykresy indyktorowe wyznaczone dla silnika o zapłonie samoczynnym typu Perkins AD3.152 z bezpośrednim wtryskiem paliwa do komory spalania usytuowanej w denku tłoka. Wykresy sporządzono przy rozwijaniu przez silnik maksymalnego momentu obrotowego  $M_o=168Nm$  przy  $n=1400obr/min$  i maksymalnej mocy  $N_e=34,5kW$  przy  $n=2000obr/min$ . Badania przeprowadzono przy zasilaniu silnika paliwem ONM City 50, którego właściwości fizykochemiczne podano w tabeli 1. Podstawowe parametry badanego silnika przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1  
Podstawowe właściwości fizykochemiczne paliw silnikowych wykorzystanych w badaniach

| Parametr  | Olej napędowy miejski ONM City 50 |
|---|-----------------------------------|
| Liczba cetanowa                                   | 51,7                              |
| Wartość opałowa [MJ/kg]                           | 43,2                              |
| Gęstość w 20°C [g/cm <sup>3</sup> ], (15°C)       | 0,817                             |
| Lepkość kinematyczna [mm <sup>2</sup> /s] (~40°C) | 2,83                              |
| Napięcie powierzchniowe [N/m] (20°C)              | 3,64                              |
| Temperatura zapłonu [°C]                          | 67                                |
| Przeciętny skład elementarny [%]                  | 87,2                              |
| - C   | 12,7                              |
| - H   | 0,002                             |
| - O   |                                   |

Tabela 2.  
Dane techniczne silnika Perkins AD3.152.

| Wielkość  | Symbol              | Jednostka       | Wartość          |
|---|---------------------|-----------------|------------------|
| Ilość cylindrów                                     | I                   | -               | 3                |
| Średnica cylindra                                   | D                   | mm              | 91,44            |
| Skok tłoka  | S                   | mm              | 127              |
| Pojemność skokowa                                   | V                   | dm <sup>3</sup> | 2,502            |
| Maksymalna moc silnika, przy prędkości obrotowej    | N<br>n              | kW<br>obr/min   | 34,5<br>2250     |
| Maksymalny moment obrotowy przy prędkości obrotowej | M <sub>o</sub><br>n | Nm<br>obr/min   | 168<br>1300÷1400 |
| Stopień sprężania                                   | ε                   | -               | 16,5             |
| Kąt dynamicznego początku tłoczenia                 | α <sub>t</sub>      | °OWK            | 15               |
| Kąt otwarcia zaworu dolotowego                      | α <sub>ozd</sub>    | °OWK            | 13 przed GMP     |
| Kąt zamknięcia zaworu dolotowego                    | α <sub>zsd</sub>    | °OWK            | 43 za DMP        |
| Kąt otwarcia zaworu wylotowego                      | α <sub>ozw</sub>    | °OWK            | 46 przed DMP     |
| Kąt zamknięcia zaworu wylotowego                    | α <sub>zsw</sub>    | °OWK            | 10 za GMP        |

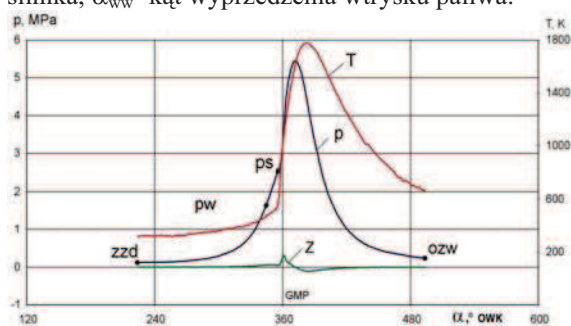
## 4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wartości wskaźników pracy silnika oraz obliczeń względnych ilości ciepła wydzielającego się i wymienianego podczas procesu spalania  $x$ ,  $x_i$  i  $x_{sc}$  otrzymane z obliczeń przeprowadzonych dla wykresów rzeczywistych i wygładzonych sporządzonych przy zamkniętym i otwartym układzie termodynamicznym przedstawiono w tabeli 3.

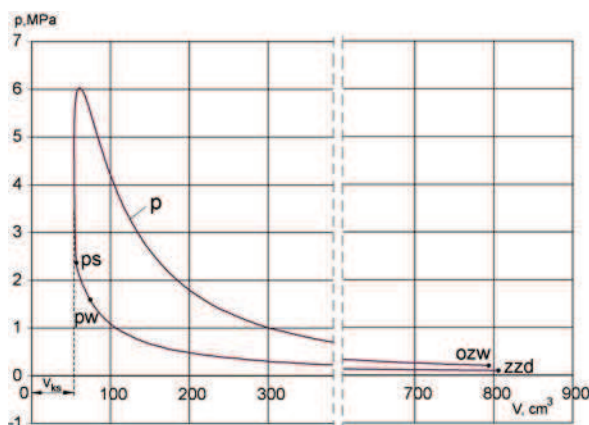
Tabela 3.  
 Wartości wskaźników pracy silnika uzyskanych z wykresów rzeczywistych i wygładzonych przy otwartym i zamkniętym układzie termodynamicznym

| Układ otwarty   |                      |                     |                      |                     |
|-----------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| -               | Przebieg rzeczywisty | Przebieg wygładzony | Przebieg rzeczywisty | Przebieg wygładzony |
| n, obr/min      | 1400                 |                     | 2000                 |                     |
| $L_i$ , J       | 713,874              | 739,643             | 710,677              | 734,371             |
| $p_i$ , MPa     | 0,856                | 0,887               | 0,852                | 0,881               |
| $\eta_i$        | 0,481                | 0,498               | 0,485                | 0,502               |
| $N_i$ , kW      | 24,986               | 25,888              | 35,534               | 36,719              |
| $M_i$ , Nm      | 170,425              | 176,571             | 169,662              | 175,318             |
| $g_i$ , g/kWh   | 206,519              | 199,324             | 204,594              | 197,993             |
| $p_{max}$ , MPa | 6,032                | 6,023               | 5,451                | 5,437               |
| $T_{max}$ , K   | 1769                 | 1817                | 1779                 | 1826                |
| $\lambda$       | 1,306                |                     | 1,696                |                     |
| Układ zamknięty |                      |                     |                      |                     |
| -               | Przebieg rzeczywisty | Przebieg wygładzony | Przebieg rzeczywisty | Przebieg wygładzony |
| n, obr/min      | 1400                 |                     | 2000                 |                     |
| $L_i$ , J       | 691,45               | 717,188             | 708,164              | 731,905             |
| $p_i$ , MPa     | 0,829                | 0,86                | 0,849                | 0,878               |
| $\eta_i$        | 0,466                | 0,483               | 0,484                | 0,5                 |
| $N_i$ , kW      | 24,201               | 25,102              | 35,408               | 36,595              |
| $M_i$ , Nm      | 165,071              | 171,216             | 169,062              | 174,73              |
| $g_i$ , g/kWh   | 213,217              | 205,565             | 205,32               | 198,66              |
| $p_{max}$ , MPa | 6,032                | 6,023               | 5,451                | 5,437               |
| $T_{max}$ , K   | 1769                 | 1817                | 1779                 | 1826                |
| $\lambda$       | 1,306                |                     | 1,696                |                     |

Na rys. 1 przedstawiono przykładowy uśredniony przebieg ciśnienia i temperatury w cylindrze oraz odfiltrowane wartości ciśnienia otrzymane za pomocą filtru górnoprzepustowego, dla silnika pracującego przy:  $n=1400\text{min}^{-1}$ ,  $M_c=150,21\text{Nm}$ ,  $g_c=4,27 \cdot 10^{-5}\text{kg/cykl}$ , oraz  $\alpha_{ww}=15^\circ\text{OWK}$  przed GMP, gdzie:  $g_c$  - dawka paliwa przypadająca na cykl pracy silnika,  $\alpha_{ww}$ - kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa.

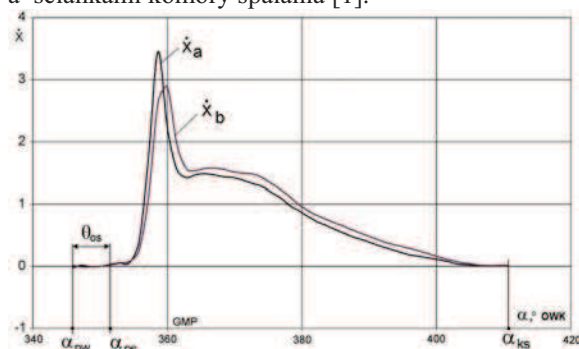


Rys.1. Przebieg ciśnienia i temperatury oraz odfiltrowanej wartości ciśnienia za pomocą filtru górnoprzepustowego w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika AD3.152 pracującego przy:  $n=1400\text{min}^{-1}$ ,  $M_c = 136\text{Nm}$ ,  $g_c=4,27 \cdot 10^{-5}\text{kg/cykl}$ , oraz  $\alpha_{ww}=15^\circ\text{OWK}$  przed GMP, gdzie: zzd- zamknięcie zaworu dolotowego, ozw- otwarcie zaworu wylotowego,  $p_w$  – początek wtrysku paliwa,  $p_s$ - początek spalania,

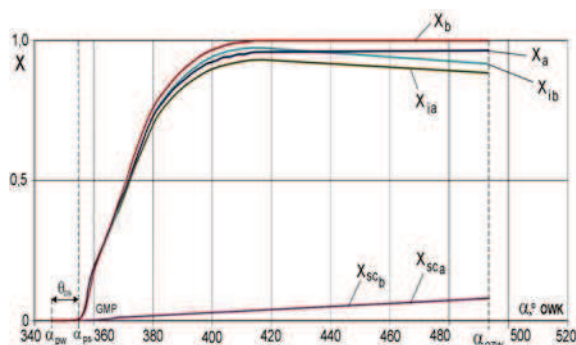


Rys.2. Przebieg zmiany ciśnienia „p” w funkcji zmiany objętości silnika AD3.152 pracującego przy:  $n=1400\text{min}^{-1}$ ,  $M_c = 136\text{Nm}$ ,  $g_c=4,27 \cdot 10^{-5}\text{kg/cykl}$ , oraz  $\alpha_{ww}=15^\circ\text{OWK}$  przed GMP, oznaczenia jak na rys. 1

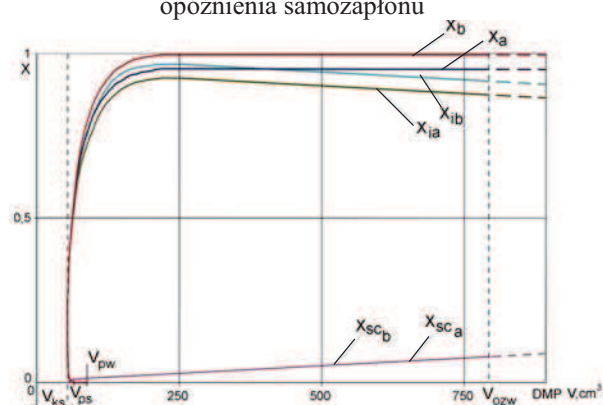
Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono charakterystyki wydzielania ciepła, które sporządzono dla rzeczywistych i wygładzonych wykresów indyktorowych. Charakterystyki te sporządzono przy założeniu, że proces całkowitego i zupełnego spalania został zakończony do chwili rozpoczęcia się procesu wylotu spalin z cylindra. Metoda ta uwzględnia zmianę ilości produktów spalania w czasie jego trwania, zależność ciepła właściwych od składu i temperatury czynnika roboczego oraz konwekcyjną wymianę ciepła między czynnikiem roboczym a ściankami komory spalania [1].



Rys.3. Przebieg zmiany prędkości względnej ilości wydzielającego się ciepła podczas procesu spalania  $\dot{x}$  w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika AD3.152 pracującego przy:  $n=1400\text{min}^{-1}$ ,  $M_c = 136\text{Nm}$ ,  $g_c=4,27 \cdot 10^{-5}\text{kg/cykl}$ , oraz  $\alpha_{ww}=15^\circ\text{OWK}$  przed GMP, gdzie: indeks dolny „a” dotyczy przebiegu zmiany prędkości  $\dot{x}$  wyznaczonej na podstawie rzeczywistego wykresu indyktorowego, indeks dolny „b” dotyczy przebiegu zmiany prędkości  $\dot{x}$  wyznaczonej na podstawie wykresu indyktorowego wygładzonego filtrem dolnoprzepustowym,  $\theta_{os}$ - kąt opóźnienia samozapłonu



Rys.4. Przebieg względnej ilości wydzielającego się ciepła  $x$ , względnej indykowanej ilości wydzielającego się ciepła  $x_i$  oraz względnej ilości ciepła przekazywanego do ścianek komory spalania  $x_{sc}$ . Wielkości te wyznaczono w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika AD3.152 pracującego przy:  $n=1400 \text{ min}^{-1}$ ,  $M_e = 136 \text{ Nm}$ ,  $g_c=4,27 \cdot 10^{-5} \text{ kg/cykl}$ , oraz  $\alpha_{ww}=15^\circ \text{ OWK}$  przed GMP, gdzie: indeks dolny „a” dotyczy wykresu wyznaczonego na podstawie rzeczywistego wykresu indykatorowego, indeks dolny „b” dotyczy wykresu wyznaczonego na podstawie wykresu indykatorowego wygładzonego filtrem dolnoprzepustowym,  $\theta_{os}$  - kąt opóźnienia samozapłonu



Rys.5. Przebieg względnej ilości wydzielającego się ciepła  $x$ , względnej indykowanej ilości wydzielającego się ciepła  $x_i$  oraz względnej ilości ciepła przekazywanego do ścianek komory spalania  $x_{sc}$  wyznaczone w funkcji zmiany objętości cylindra silnika AD3.152 pracującego przy:  $n=1400 \text{ min}^{-1}$ ,  $M_e = 136 \text{ Nm}$ ,  $g_c=4,27 \cdot 10^{-5} \text{ kg/cykl}$ , oraz  $\alpha_{ww}=15^\circ \text{ OWK}$  przed GMP, gdzie: gdzie: indeks dolny „a” dotyczy przebiegu wyznaczonego na podstawie rzeczywistego wykresu indykatorowego, indeks dolny „b” dotyczy wykresu wyznaczonego na podstawie wygładzonego wykresu indykatorowego filtrem dolnoprzepustowym,  $\theta_{os}$  - kąt opóźnienia samozapłonu

## 5. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- wygładzenie przebiegu ciśnienia filtrem dolnoprzepustowym zapewnia otrzymanie gładkiego przebiegu wiarygodnej, średniej wartości maksymalnego ciśnienia i temperatury

maksymalnej cyklu, a zatem i łagodniejszy przebieg charakterystyk względnych ilości wydzielającego się ciepła dla kątów obrotu wału korbowego silnika znajdujących się w pobliżu GMP tłoka,

- wygładzony przebieg ciśnienia zapewnia otrzymanie wartości wskaźników indykowanych takich jak sprawność indykowana  $\eta_i$ , średnie ciśnienie indykowane  $p_i$ , średnie indykowane zużycie paliwa  $g_i$  itp. z błędem nie przekraczającym 4%,
- kąt opóźnienia samozapłonu wyznaczony wg metody [1] zarówno dla rzeczywistego jak i wygładzonego przebiegu ciśnień przyjmował prawie takie same wartości liczbowe

## LITERATURA

- [1] Ambrozik A.: Wybrane zagadnienia procesów cieplnych w tłokowych silnikach spalinowych. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2003.
- [2] Ambrozik A., Łagowski P.: Wpływ wybranych charakterystyk wydzielania ciepła w silnikach ZS na jego wskaźniki indykowane. Kraków, Zeszyty Nr 26-27, 2003, s.23-32.



Dr hab. inż. Andrzej Ambrozik jest profesorem na Wydziale Modelowania i Zarządzania Komputerowego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach



Mgr inż. Tomasz Ambrozik jest pracownikiem Zakładu Elektroniki Wyższej Szkoły Telekomunikacji i Informatyki w Kielcach,



Mgr inż. Dariusz Kurczyński jest asystentem w Zakładzie Silników Spalinowych i Maszyn Roboczych Katedry Pojazdów i Sprzętu Mechanicznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach



Mgr inż. Piotr Łagowski jest asystentem w Zakładzie Silników Spalinowych i Maszyn Roboczych Katedry Pojazdów i Sprzętu Mechanicznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach