

Charakterystyka gęstości czasowej silników spalinowych maszyn eksploatowanych w kopalniach węgla kamiennego

Streszczenie

Charakterystyka TD (Time Density), opracowana dla napędów spalinowych eksploatowanych w kopalniach węgla kamiennego, pozwala na sklasyfikowanie silnika i określenie reprezentatywnego cyklu badawczego oraz wagi poszczególnych faz tego cyklu. W artykule przedstawiono metodę sporządzania charakterystyk gęstości czasowej TD maszyn z silnikiem spalinowym oraz metody pośredniego i bezpośredniego określenia momentu obrotowego niezbędnego do sporządzenia charakterystyki TD.

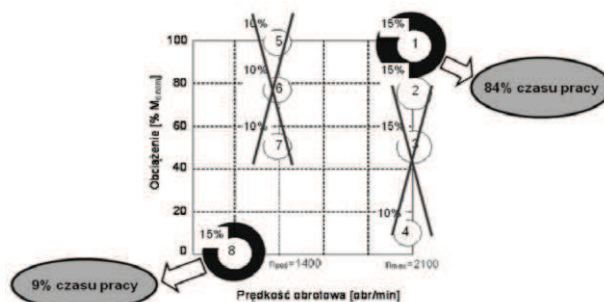
Słowa kluczowe: silnik spalinowy, charakterystyka gęstości czasowej, górnictwo
Keywords: diesel engine, time density characteristics, mining industry

Summary

Time Density Characteristics (TD), developed for diesel engines operating in hard coal mines enables classification of engine and determining the representative testing cycle and weight of each phase of the cycle. The method for preparation of TD characteristics of diesel engines as well as indirect or direct determination of torque indispensable for development of TD characteristics, is presented.

1. Wstęp

Silniki spalinowe eksploatowane w maszynach transportowych charakteryzuje zmienność zarówno obciążenia, jak i prędkości obrotowej. Jest to uzależnione od profilu trasy jezdnej, wymagań dotyczących ruchu, jak i subiektywnych zachowań kierowców prowadzących środek transportowy. Charakterystyka gęstości czasowej TD (Time Density) stanowi mapę rozkładu czasu pracy silnika w poszczególnych punktach współpracy z układem przeniesienia napędu w obszarze charakterystyki uniwersalnej silnika. Charakterystyka TD wiąże właściwości silnika ze sposobem jego eksploatacji, pozwala na sklasyfikowanie silnika i określenie odpowiedniego cyklu badawczego testu homologacyjnego. Dla silników o zastosowaniu pozadrogowym przeprowadza się test stacjonarny NRSC (non road stationary cycle) zgodnie z normą ISO 8178. Opracowanie lub dobór testu homologacyjnego zgodnego z normą ISO 8178, dedykowanego do maszyn pracujących w wyrobiskach podziemnych, wymaga określenia charakterystyki gęstości czasowej, na podstawie której można określić wagi poszczególnych faz cyklu badawczego. Badania opisane w pracy [7] dotyczącej kombajnów zbożowych wykazują, że w odniesieniu do tych maszyn test NRSC nie odpowiada rzeczywistym warunkom eksploatacyjnym. Charakter eksploatacji silników kombajnów zbożowych pozwala stwierdzić, że test badawczy NRSC mógłby w swojej najprostszej postaci składać się z dwóch faz (rys.1) [7].



Rys. 1. Analiza wyników pracy silników kombajnów zbożowych w aspekcie testu NRSC [7]

Na podstawie wyników prac [7] i [8] można domniemywać, że homologacyjny test badawczy silników eksploatowanych w wyrobiskach węgla kamiennego odbiega od rzeczywistych warunków ich pracy.

2. Charakterystyka gęstości czasowej TD

Charakterystykę TD można zidentyfikować na podstawie przebiegu w czasie dwóch zmiennych charakteryzujących pracę silnika (1):

$$n = n(t) \text{ i } M_o = M_o(t) \text{ dla } t \in (0, t_e) \quad (1)$$

gdzie:

n – prędkość obrotowa silnika,

M_o – moment obrotowy silnika,

t_e – czas okresu eksploatacji.

Pole pracy silnika, które obrazuje wykres charakterystyki zewnętrznej obciążenia M_o w funkcji prędkości obrotowej n dzieli się na prostokątne elementy o wymiarach (rys. 2):

$$\Delta n = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{N} \quad (2)$$

$$\Delta M_o = \frac{M_{o\max} - M_{o\min}}{M}$$

gdzie:

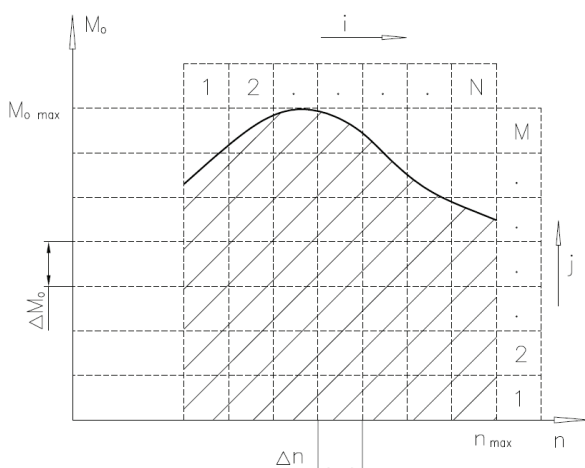
N, M – liczba przedziałów na osiach n i M_o .

Pole powierzchni elementu o numerach (i, j) gęstości czasowej TD zdefiniowano zależnością (3):

$$TD_{(i,j)} = \frac{t_{(i,j)}}{t_e} \quad (3)$$

gdzie:

$t_{(i,j)}$ – czas pracy silnika w polu pracy o współrzędnych i, j .



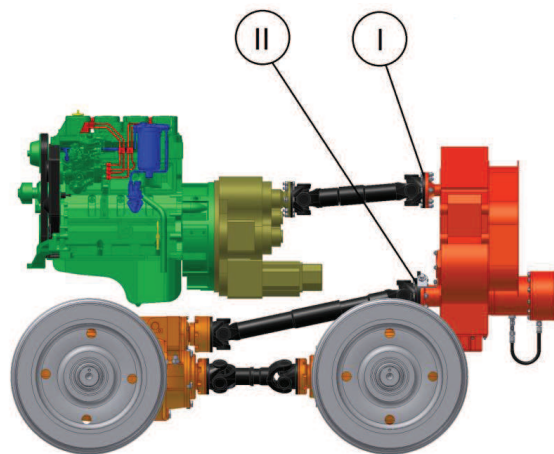
Rys. 2. Podział pola pracy silnika na elementy [1]

Określenie prędkości obrotowej silnika nie stanowi większego problemu. Problemem technicznym jest natomiast określenie momentu obrotowego na wale korbowym silnika. Moment obrotowy można określić w sposób bezpośredni za pomocą jego pomiaru momentomierzem zabudowanym w układzie napędowym lub w sposób pośredni na podstawie innego parametru pracy silnika.

3. Określenie momentu obrotowego poprzez bezpośredni pomiar momentomierzem zabudowanym w układzie napędowym

Bezpośredni pomiar momentu obrotowego silnika napędowego maszyn dołowych wymaga ingerencji w układ napędowy maszyny. Najkorzystniejszym miejscem zabudowy momentomierza jest połączenie wału korbowego z pozostałą częścią układu napędowego.

Taka zabudowa eliminuje wpływ zakłóceń wywołanych przez podzespoły układu napędowego. W lokomotywach z mechanicznym przeniesieniem napędu i przekładnią hydrokinetyczną, możliwa jest zabudowa momentomierza w miejscu połączenia kołnierzy wałów napędowych z przekładnią rewersyjną (rys. 3) [3].



Rys. 3. Schemat układu napędowego lokomotywy wraz z proponowanymi miejscami zabudowy momentomierza I i II [3]

W takim przypadku, w celu określenia momentu obrotowego na kole zamachowym silnika, należy uwzględnić przełożenie dynamiczne przekładni hydrokinetycznej zabudowanej na silniku spalinowym, zgodnie ze wzorem (4):

$$M_o = \frac{M_u}{i_d} \quad (4)$$

gdzie:

M_o – moment obrotowy na kole zamachowym,

M_u – moment obrotowy w układzie napędowym,

i_d – przełożenie dynamiczne przekładni hydrokinetycznej.

We wzorze (4) należy uwzględnić zmienność przełożenia dynamicznego i_d od przełożenia kinematycznego i_k :

$$i_d = f(i_k) \quad (5)$$

4. Pośrednie określenie momentu obrotowego

Moment obrotowy w sposób pośredni można określić na podstawie danych o chwilowym zużyciu paliwa, temperaturze spalin lub poprzez informacje oysterowaniu urządzeń zasilających.

4.1. Określenie momentu obrotowego na podstawie pomiaru zużycia paliwa

Niezbędny do wyznaczenia charakterystyki gęstości czasowej moment obrotowy może być wyznaczony metodą pośrednią poprzez pomiar zużycia paliwa przy

danej prędkości obrotowej. Można go wyznaczyć ze wzoru na podstawie zależności (6) [2]:

$$M_o = B \cdot \eta_c \cdot Q \quad (6)$$

gdzie:

B – stała, specyficzna do badanego silnika [N/m²],

η_c - sprawność cieplna,

Q - dawka paliwa na cykl [m³].

Moment obrotowy silnika można również wyznaczyć, uwzględniając zużycie paliwa, wg wzoru (7) [5]:

$$M_o = a \cdot g_{1000}^3 + b \cdot g_{1000}^2 + c \cdot g_{1000} + d \quad (7)$$

gdzie:

a, b, c, d – charakterystyczne współczynniki dla danego silnika,

g_{1000} - zużycie paliwa na 1000 obrotów [dm³/1000 obr].

W celu wyznaczenia współczynników podanych we wzorze (7) należy skorzystać z wykresu uniwersalnego danego silnika oraz wzoru (8) [5]:

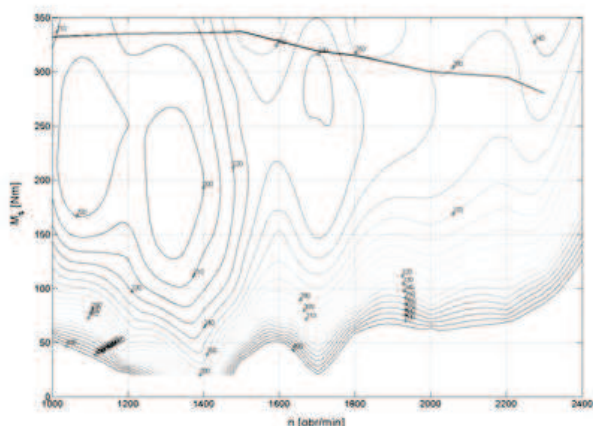
$$g_{1000} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_o \cdot g_e}{3600 \cdot 10^3 \cdot \rho_{pal}} \quad (8)$$

gdzie:

g_e - jednostkowe zużycie paliwa [g/(kW*h)],

ρ_{pal} - gęstość paliwa [kg/dm³].

Na podstawie charakterystyki uniwersalnej silnika można określić zużycie paliwa g_{1000} . Dla każdej prędkości obrotowej wału korbowego powstaje uszeregowany ciąg liczb tworzących funkcję wielomianową. Na rysunku 4 przedstawiono charakterystykę uniwersalną silnika spalinowego, o mocy 81 kW, który zastosowano, między innymi, w dołowych lokomotywach spalinowych konstrukcji ITG KOMAG.



Rys. 4. Charakterystyka uniwersalna silnika spalinowego stosowanego w spalinowym napędzie górniczym [4]

4.2. Określenie momentu obrotowego na podstawieysterowania urządzeń zasilających

Informacja oysterowaniu urządzenia zasilającego silnik, np.: o położeniu zadajnika prędkości, położeniu listwy pompy zasilającej, czy czasu otwarcia wtryskiwacza pozwala na określenie dawki (zużycia) paliwa. W tym przypadku pomiar zużycia paliwa realizowany jest pośrednio. W przypadku wykorzystania informacji o wychyleniu zadajnika prędkości ograniczeniem jest rodzaj zastosowanego w silnika regulatora. Regulator wielozakresowy uniemożliwia poprawne określenie dawki paliwa, ponieważ ma on zdolność regulacji w całym zakresie prędkości (regulator ma możliwość zmiany dawki paliwa pod wpływem obciążenia). Regulator dwuzakresowy odpowiada za regulację biegu jałowego oraz prędkości maksymalnej. W pozostałym zakresie prędkości, w którym dawka paliwa jest niezależna od obciążenia silnika, dawka ta jest proporcjonalna do wychylenia zadajnika prędkości, co umożliwia jej określenie.

4.3. Określenie momentu obrotowego na podstawie temperatury spalin

Wartość średniego użytecznego momentu obrotowego silnika spalinowego można wyznaczyć na podstawie wzoru (9) [9]:

$$M_o = \frac{V_s \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \cdot p_e \quad (9)$$

gdzie:

V_s - objętość skokowa cylindra,

i - liczba cylindrów,

τ - współczynnik uwzględniający liczbę suwów, 1-silnik dwusuwowy, 2-silnik czterosuwowy,

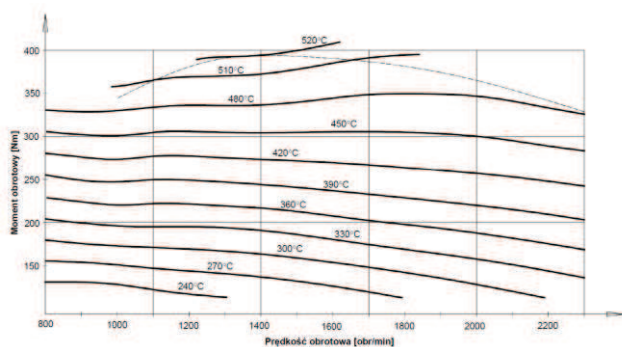
p_e - średnie ciśnienie użyteczne.

Uwzględniając, że średnie ciśnienie użyteczne jest wartością zmienną, wartość momentu obrotowego jest wprost proporcjonalna do wartości średniego ciśnienia użytecznego. Wartość p_e proporcjonalna do zapotrzebowania na moment M_o w trakcie pracy silnika, osiągnięta jest poprzez dostarczenie ciepła czynnikowi termodynamicznemu. Ciepło to pozyskane jest w wyniku spalania paliwa. Jego ilość, zgodnie z obiegiem termodynamicznym Sabathe, jest równa (10) [9]:

$$\begin{aligned} Q_v &= c_v (\Delta T_v) - \text{ciepło doprowadzone przy } V=\text{const} \\ Q_p &= c_p (\Delta T_p) - \text{ciepło doprowadzone przy } p=\text{const} \end{aligned} \quad (10)$$

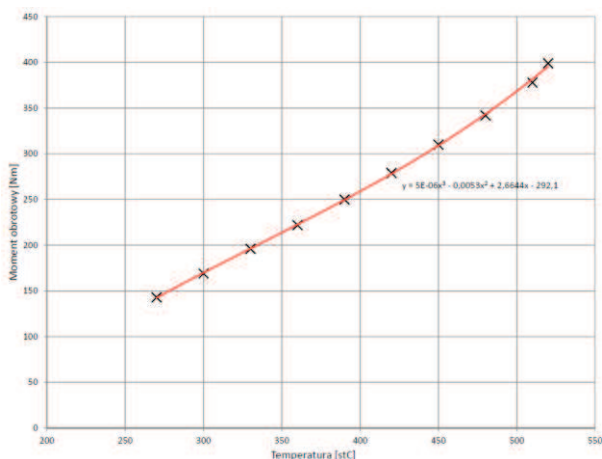
Wartość temperatury informuje w sposób pośredni o wartości momentu obrotowego na wale silnika. Ze względów technicznych najkorzystniejszym miejscem pomiaru temperatury jest jej pomiar na wylocie z kolektora wylotowego lub, w przypadku

silników doładowanych, za turbiną. W przypadku przeciwwybuchowych napędów spalinowych należy uwzględnić wpływ chłodzonego kolektora wylotowego wraz z korpusem turbosprężarki. Na rysunku 5 przedstawiono przebieg izoterm silnika spalinowego o mocy 81 kW, stosowanego między innymi w napędach spalinowych lokomotywy dla kopalni węgla kamiennego konstrukcji ITG KOMAG.



Rys. 5. Przebieg izoterm temperatury na wykresie M_o - n .
[Źródło: opracowanie własne]

Na podstawie ww. charakterystyki można, dla poszczególnych prędkości obrotowych, określić przebieg zmian momentu obrotowego w funkcji temperatury spalin. Jest to funkcja odwrotna, ponieważ w rzeczywistych warunkach temperatura spalin jest wynikiem obciążenia silnika. Na rysunku 6 przedstawiono wartości momentu obrotowego dla temperatury spalin dla stałej prędkości obrotowej $n=1400$ obr/min.



Rys. 6. Charakterystyka momentu obrotowego w funkcji temperatury spalin przy stałej prędkości obrotowej 1400 obr/min [Źródło: opracowanie własne]

Moment obrotowy można określić na podstawie zależności (11):

$$M_o = a \cdot T^3 + b \cdot T^2 + c \cdot T + d \quad (11)$$

gdzie:

a, b, c, d – współczynniki charakterystyczne dla danego silnika,

T - temperatura spalin.

Podobnie jak w metodzie polegającej na pomiarze zużycia paliwa, funkcję $M_o = f(t)$ opisuje wielomian trzeciego stopnia. Wyznaczone współczynniki a, b, c i d dla założonych przedziałów prędkości obrotowych przedstawiono w tabeli 1.

Wartość współczynników a, b, c, d funkcji $M_o=f(t)$

[Źródło: opracowanie własne]

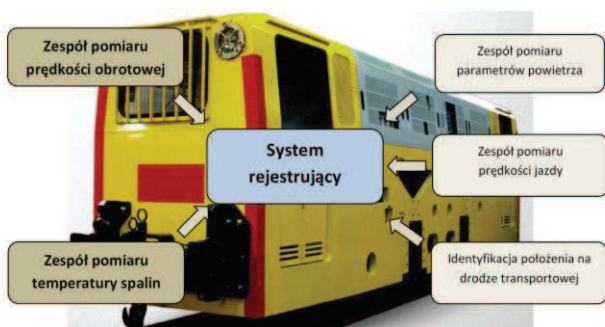
Tabela 1

Prędkość obrotowa silnika [Obr/min]	Współczynnik			
	a	b	c	d
Poniżej 900	$-1 \cdot 10^{-7}$	0,0005	0,55	-20,841
900-1100	$6 \cdot 10^{-7}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	0,639	-24,159
1100-1300	$2 \cdot 10^{-6}$	-0,0014	1,2477	-119,8
1300-1500	$5 \cdot 10^{-6}$	-0,0053	2,6644	-292,1
1500-1700	$4 \cdot 10^{-6}$	-0,0031	1,7022	-178,5
1700-1900	$8 \cdot 10^{-6}$	0,0074	3,1934	-362,7
1900-2100	$6 \cdot 10^{-6}$	-0,052	2,3798	-281,6
2100-2300	$5 \cdot 10^{-6}$	-0,0045	2,3212	-316,57

5. Monitorowanie parametrów pracy maszyny spalinowej w kopalniach węgla kamiennego w aspekcie sporządzenia charakterystyk TD

Maszyny transportowe pracujące w wyrobiskach zagrożonych atmosferą wybuchową, wyposażone w silnik spalinowy wraz z układem dolotowo-wylotowym specjalnej konstrukcji, powinny spełniać odpowiednie wymagania bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Jednym z najważniejszych z nich, stanowiącym istotne ograniczenie w stosowaniu silników spalinowych, jest warunek nieprzekroczenia maksymalnej temperatury powierzchni zewnętrznych napędu, wynoszącej 150°C . Napęd spalinowy powinien również spełniać wymagania dotyczące budowy przeciwwybuchowej silnika, oprzyrządowania elektrycznego i elektronicznego sterującego nim oraz systemu monitorującego stan jego pracy. W celu sporządzenia charakterystyki czasowej wymagana jest znajomość przebiegu w czasie parametrów prędkości obrotowej oraz momentu obrotowego silnika spalinowego. Przedstawiono kilka metod pozwalających na określenie momentu obrotowego na wale silnika spalinowego. Bezpośredni pomiar momentu obrotowego powoduje trudności w jego zabudowie. Uwzględniając konstrukcje maszyn eksploatowanych w wyrobiskach podziemnych, zdaniem autora, pomiar pośredni na podstawie temperatury spalin jest najbardziej uzasadniony. Wymaga on jednak znajomości charakterystyki uniwersalnej badanego silnika, którą wykonuje się na

hamowni. Na rysunku 7 przedstawiono składniki systemu rejestrującego parametry pracy silnika spalinowego, który pozwala na wyznaczenie charakterystyk gęstości czasowych na podstawie pomiaru temperatury spalin.



Rys. 7. Składniki systemu rejestracji parametrów pracy silnika spalinowego [Źródło: opracowanie własne]

Przedstawiony na schemacie system powinien pozwolić na rejestrację:

- prędkości obrotowej silnika spalinowego,
- temperatury spalin,
- prędkości liniowej maszyny,
- parametrów powietrza na dolocie do silnika.

Pomiar temperatury spalin powinien być przeprowadzony w początkowej części układu wylotowego, za turbosprężarką. Ponieważ układ wylotowy maszyn dołowych jest budowy przeciwwybuchowej, zabudowa czujnika temperatury, jak również pozostałych zespołów monitorujących parametry pracy maszyny powinny spełniać wymagania budowy przeciwwybuchowej.

6. Podsumowanie

Charakterystyka gęstości czasowych dostarcza informacji o czasie pracy maszyny w poszczególnych punktach pracy w obszarze charakterystyki uniwersalnej silnika spalinowego. W celu sporządzenia charakterystyki gęstości czasowej wymagana jest znajomość przebiegu w czasie, parametrów prędkości obrotowej oraz momentu obrotowego silnika spalinowego. W niniejszej pracy przedstawiono kilka metod pomiaru momentu obrotowego, który można określić w sposób bezpośredni lub pośredni na podstawie innego parametru pracy silnika. Pomiar pośredni momentu obrotowego na podstawie zużycia paliwa lub temperatury spalin wymaga znajomości charakterystyki uniwersalnej badanego silnika, którą wykonuje się na hamowni. Pomiar pośrednie nie wymagają dużej ingerencji w układ napędowy jednak obciążone są większym błędem w porównaniu z pomiarem bezpośrednim momentu obrotowego.

Charakterystyka gęstości czasowej pozwala, między innymi na określenie wielkości emisji spalin do środowiska. Skład chemiczny spalin jest ściśle związany ze sposobem eksploatacji napędu spalinowego. Na podstawie charakterystyki TD oraz charakterystyki emisji substancji toksycznych danego silnika można określić ilościowy oraz jakościowy skład spalin. Jest to szczególnie istotne w przypadku maszyn eksploatowanych w wyrobiskach podziemnych, ponieważ emisja spalin realizowana jest do ograniczonej przestrzeni wyrobiska.

Literatura

1. Cichy M.: Nowe teoretyczne ujęcie charakterystyki gęstości czasowej. *Silniki Spalinowe* 2-3/1987.
2. De Souza E.G., Milanez L.F.: Indirect Evaluation of the Torque of Diesel Engines. *Transactions of the ASAE* 5 (31), 1986.
3. Dobrzaniecki P.: Propozycja wykorzystania momentomierza do analizy układu napędowego lokomotywy typu LDS-100K-EMA. *Masz. Gór.* 2014 nr 4 s. 22-27.
4. Dobrzaniecki P., Mężyk A.: Kształtowanie cech eksploatacyjnych górniczych pojazdów spalinowych. ITG KOMAG, Gliwice 2012.
5. Koniuszy A.: Metoda sporządzania charakterystyki gęstości czasowej silników ciągnikowych. *Silniki Spalinowe* 2/2008.
6. Kaczmarczyk K.: Metoda dostosowania silnika do wymagań stawianych górniczym napędem spalinowym, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, Gliwice 2014.
7. Merkisz J., Lijewski P., Wasalik S.: Analiza charakterystyk gęstości czasowej silników zbożowych w aspekcie obowiązujących przepisów dotyczących emisji spalin. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2010, Vol. 55(1).
8. Merkisz J., Lijewski P., Wasalik S.: Analiza warunków pracy silników pojazdów o zastosowaniach pozadrogowych w aspekcie przepisów dotyczących emisji związków toksycznych spalin. *Eksploatacja i niezawodność* nr 1/2010.
9. Wajand A. J.: *Trakcyjne silniki z zapłonem samoczynnym*. WNT, Warszawa 1973.

Artykuł wpłynął do redakcji w maju 2015 r.