

THE INFLUENCE OF LOAD PARAMETERS ON UNREPEATABILITY OF WORKING CYCLES AT LOW SI ENGINE SPEED

Grzegorz Przybyła, Stefan Postrzednik

Silesian University of Technology
Institute of Thermal Engineering
Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, Poland
tel.: +48 32 2372301, fax: +48 32 2371332
e-mails: przybyla@itc.polsl.pl, postrzed@itc.polsl.pl

Abstract

During investigation concerning internal processes taking place in internal combustion engine, the basic measurement is in-cylinder pressure signal. Obtained results were used as input data for calculating basic parameters of working cycle (e. g. function of fuel combustion, function of reach of torque, the temperature function during combustion).

The main problem during the interpretation of obtained results, are minor differences between the functions of pressures existing in following working cycles of the engine. The parameters of following working cycle (e.g. stability of working point, engine speed \dot{n}_0 , torque $M_{o,e}$) depend on processes taking place in combustion chamber and stability of set point values. The one of the most important parameter deciding about differences between following working cycles are the loss of the air-fuel mixture. Mentioned processes cause problems with proper creating of reference cycle.

In this paper results concerning indication researches of combustion engine with spark ignition have been presented. The indicator functions of following cycles were analyzed. Obtained results were used to determination define the influence of the engine parameters on the maximum pressure in collected pressure functions. Over 200 following working cycles were analyzed. The low engine speed ($\dot{n}_0 = 1000$ rpm) was constant. The torque was changed from idle run up to maximum value.

All results were analyzed statistically. The function of density and distribution of maximal pressure in cylinder of engine were determined. Besides an index of maximum indication pressure unrepeatability was determined on the basis of measurement data.

Keywords: in-cylinder pressure, combustion engine, ideal cycle, density function, distribution function

WPLYW PARAMETRÓW OBCIĄŻENIA NA NIEPOWTARZALNOŚĆ CYKLI PRACY PRZY NISKIEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA SPALINOWEGO ZI

Streszczenie

W badaniach procesów wewnętrznych (metoda indykacji) zachodzących w silnikach spalinowych, podstawowym sygnałem mierzonym jest chwilowa wartość ciśnienia w cylindrze silnika.

Zasadniczy problem podczas interpretacji uzyskanych wyników stanowią znaczne różnice przebiegów ciśnień, w następujących po sobie cyklach pracy silnika spalinowego (głównie w silniku ZI). Niepowtarzalność cykli powoduje istotne trudności z wyznaczaniem tzw. obiegu reprezentatywnego.

W artykule zaprezentowano wyniki badań indykacyjnych silnika spalinowego z zapłonem iskrowym, pracującego przy niskiej prędkości obrotowej. Szczegółowej analizie poddano wykresy indykatorowe w kolejnych następujących po sobie cyklach pracy.

Uzyskane wyniki pomiarowe zostały wykorzystane do określenia wpływu parametrów obciążenia silnika spalinowego (M_o , \dot{n}_0), na wartość ciśnienia maksymalnego w zebranych wykresach indykatorowych. Analizie poddano 240 następujących po sobie, cykli roboczych w wybranych punktach pracy silnika. Wykorzystano wskaźnik

niepowtarzalności cykli, oparty o wartość ciśnienia maksymalnego w danym cyklu, przy uwzględnieniu także jego wartości średniej.

Całość wyników poddano niezbędnej obróbce statystycznej; wyznaczone zostały funkcje gęstości oraz funkcje rozkładu ciśnienia maksymalnego w cylindrze silnika. Ponadto na podstawie zebranych danych pomiarowych wyznaczono wskaźnik niepowtarzalności maksymalnego ciśnienia indykowanego. Zaprezentowane wyniki stanowią rezultaty drugiego etapu badań w odniesieniu do pracy [6].

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, indykacja, ciśnienie maksymalne, niepowtarzalność cykli, funkcja gęstości, funkcja rozkładu, obieg reprezentatywny

1. Wstęp

Podczas badań procesów wewnętrznych zachodzących w silnikach spalinowych, podstawowym sygnałem mierzonym (metoda indykacji) jest chwilowa wartość ciśnienia w cylindrze silnika. Otrzymywane wyniki pomiarowe stanowią najczęściej dane wejściowe do obliczeń charakterystycznych parametrów cyklu roboczego (np. przebiegu wypalania paliwa, pozyskiwania momentu obrotowego, przebiegu temperatury podczas spalania).

Podstawowym problemem podczas interpretacji uzyskanych wyników pomiarowych, są znaczne różnice rejestrowanych przebiegów ciśnienia, w następujących po sobie cyklach pracy silnika spalinowego (głównie w silniku ZI). Przedstawione zjawisko powoduje pewne trudności z wyznaczaniem tzw. obiegu reprezentatywnego.

Istotny wpływ na kształt kolejnego obiegu ma charakter zjawisk zachodzących w komorze roboczej (proces napełniania, inicjacja zapłonu, jednorodność mieszanki palnej). Podczas badań silnika na stanowisku hamownianym, dodatkowym czynnikiem decydującym o kształcie obiegu rzeczywistego jest stabilność parametrów zadanego punktu pracy (prędkości obrotowej \dot{r}_0 , momentu obrotowego $M_{o,e}$, stabilizacja temperatury oleju oraz płynu chłodzącego). Jednym z ważniejszych czynników decydujących o nierównomierności kolejnych cykli, jest brak zapłonu mieszaniny palnej w cylindrze. Jest to zjawisko wysoce niekorzystne, wpływające bezpośrednio na efekty energetyczne, ekonomiczne, jak i na jakość spalin emitowanych przez silnik.

W obecnie produkowanych pojazdach samochodowych, stosowane są silniki spalinowe, wyposażone w zaawansowane układy diagnostyki pokładowej (system OBD II) [5], [4]. Jednym z elementów diagnostyki, jest identyfikacja wypadania zapłonu w kolejnym cylindrze silnika spalinowego. Systematyczne udoskonalanie algorytmów sterowania silnikiem, prowadzi do coraz większej eliminacji tego zjawiska.

Ograniczona powtarzalność kolejnych cykli roboczych silnika, występuje zawsze, nawet przy całkowitym wyeliminowaniu wypadania zapłonu. Reprezentatywny obieg dla określonego punktu pracy silnika spalinowego wymaga wprowadzenia do analizy metod statystycznych. Jako kryterium reprezentatywności przyjmuje się zwykle wartość maksymalnego ciśnienia w cylindrze. Zmienne losowe stanowią w tym przypadku wartości maksymalnego ciśnienia z kolejnych wykresów indykatorowych.

2. Niepowtarzalność cykli pracy silnika spalinowego

Obserwując przebiegi wykresów indykatorowych w następujących po sobie cyklach pracy, wyraźnie zauważalne są różnice w wartościach maksymalnego ciśnienia w kolejnych obiegach. Sytuacja ta występuje nawet przy wysokiej stabilizacji parametrów obciążenia ($M_{o,e}$, \dot{r}_0). Jednym ze kryteriów określania niepowtarzalności cykli pracy silnika, jest analiza oparta na wartościach ciśnień maksymalnych.

Ocenę stopnia niepowtarzalności ciśnienia maksymalnego w cylindrze silnika spalinowego, przeprowadzono poprzez analizę 240 następujących po sobie, cykli pracy silnika ZI. Uzyskany zbiór ciśnień maksymalnych podzielono na 12 równych klas k , z przedziału:

$$k \in \langle p_{\max,A}, p_{\max,B} \rangle, \quad (1)$$

gdzie:

$p_{\max,A}$ – najmniejsza wartość ciśnienia maksymalnego w zarejestrowanych cyklach,
 $p_{\max,B}$ – największa wartość ciśnienia maksymalnego w zarejestrowanych cyklach.

W pierwszej kolejności określano średnią wartość ciśnienia maksymalnego \bar{p}_{\max} , z otrzymanego zbioru (1), na podstawie zależności:

$$\bar{p}_{\max} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} p_{\max,i}, \quad (2)$$

gdzie:

N_0 – liczba analizowanych ciśnień maksymalnych (liczba zarejestrowanych cykli, $N_0=240$),
 $p_{\max,i}$ – wartość ciśnienia maksymalnego w i – tym obiegu.

Dla przyjętego podziału $k=12$ klas, funkcja gęstości rozkładu, występowania ciśnienia maksymalnego o wartościach z przedziału (1), wynosi:

$$\left(\frac{dF_p}{dp_{\max}} \right) = \frac{N_j}{N_0}, \quad 1 \leq j \leq k, \quad (3)$$

gdzie: N_j – liczba ciśnień maksymalnych $p_{\max,i}$, mieszczących się w kolejnej j – tej klasie ($1 \leq j \leq k$).

Całkując równanie (3) uzyskuje funkcję rozkładu F_p , określającą prawdopodobieństwo występowania w zarejestrowanych cyklach N_0 , wartości ciśnień z wybranego przedziału:

$$F_p(p_{\max,A} \leq p_{\max} \leq p_{\max}^*) = \int_{p_{\max,A}}^{p_{\max}^*} \left(\frac{dF_p}{dp_{\max}} \right) dp_{\max}, \quad (4)$$

przy czym:

$$p_{\max}^* \leq p_{\max,B}, \quad (5)$$

natomiast dla:

$$F_p(p_{\max,A} \leq p_{\max} \leq p_{\max,B}) = 1.$$

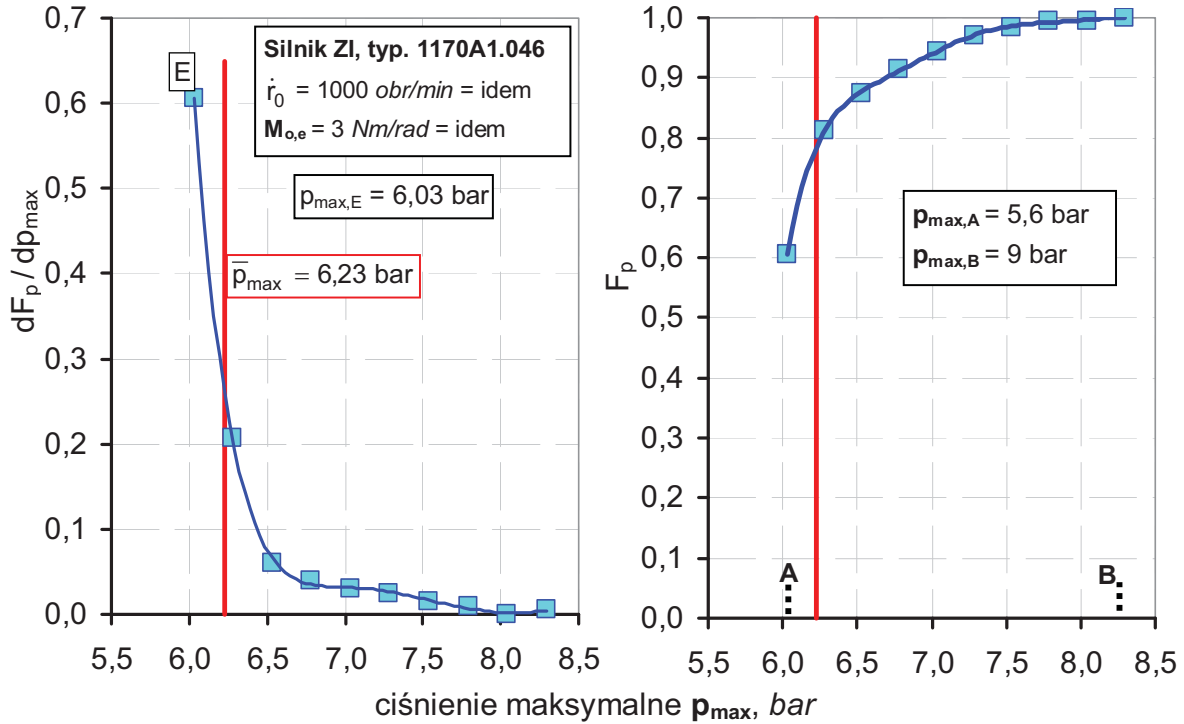
W badaniach silników spalinowych, charakterystyka kolejnych cykli pracy, określana jest najczęściej na podstawie tzw. wskaźnika niepewtarzalności ciśnienia maksymalnego $\mu_{\bar{p}_{\max}}$ w kolejnym obiegu [1], który wyznacza się z zależności:

$$\mu_{\bar{p}_{\max}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} (p_{\max,i} - \bar{p}_{\max})^2}}{\bar{p}_{\max}}. \quad (6)$$

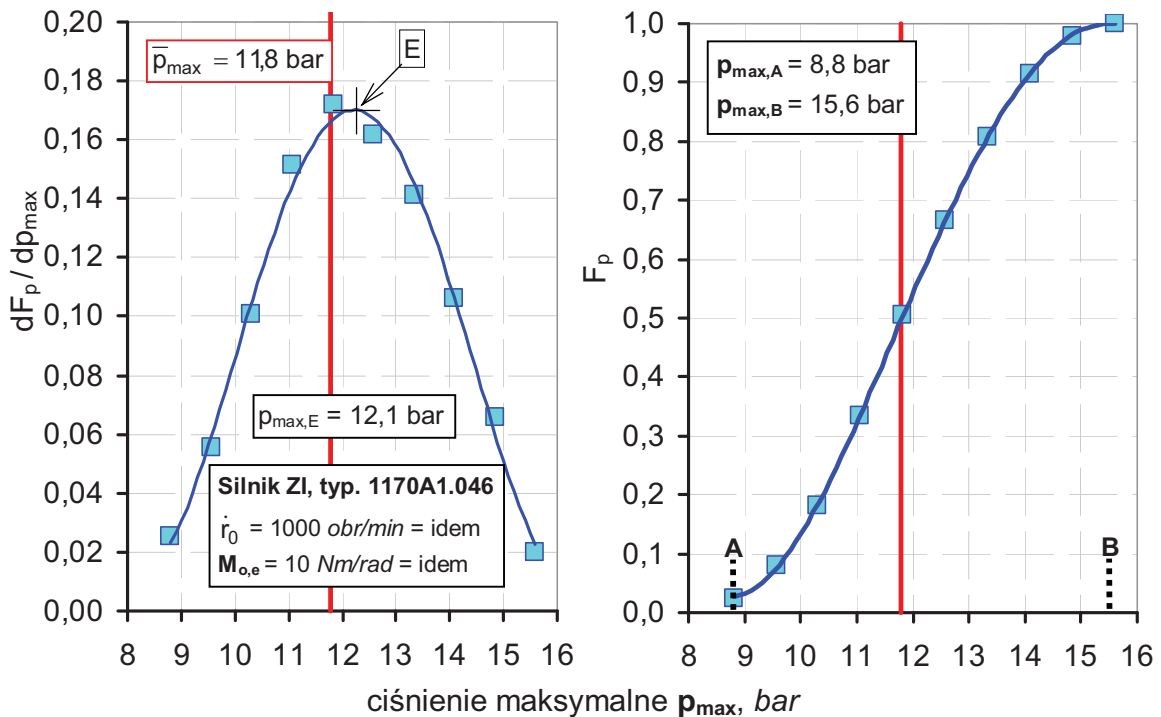
W niektórych publikacjach [2], [3], proponuje się wykorzystać podobnie zdefiniowane wskaźniki niepewtarzalności, lecz odnoszone do średniego ciśnienia indykowanego (jednostkowej pracy wewnętrznej).

3. Analiza wyników obliczeniowych

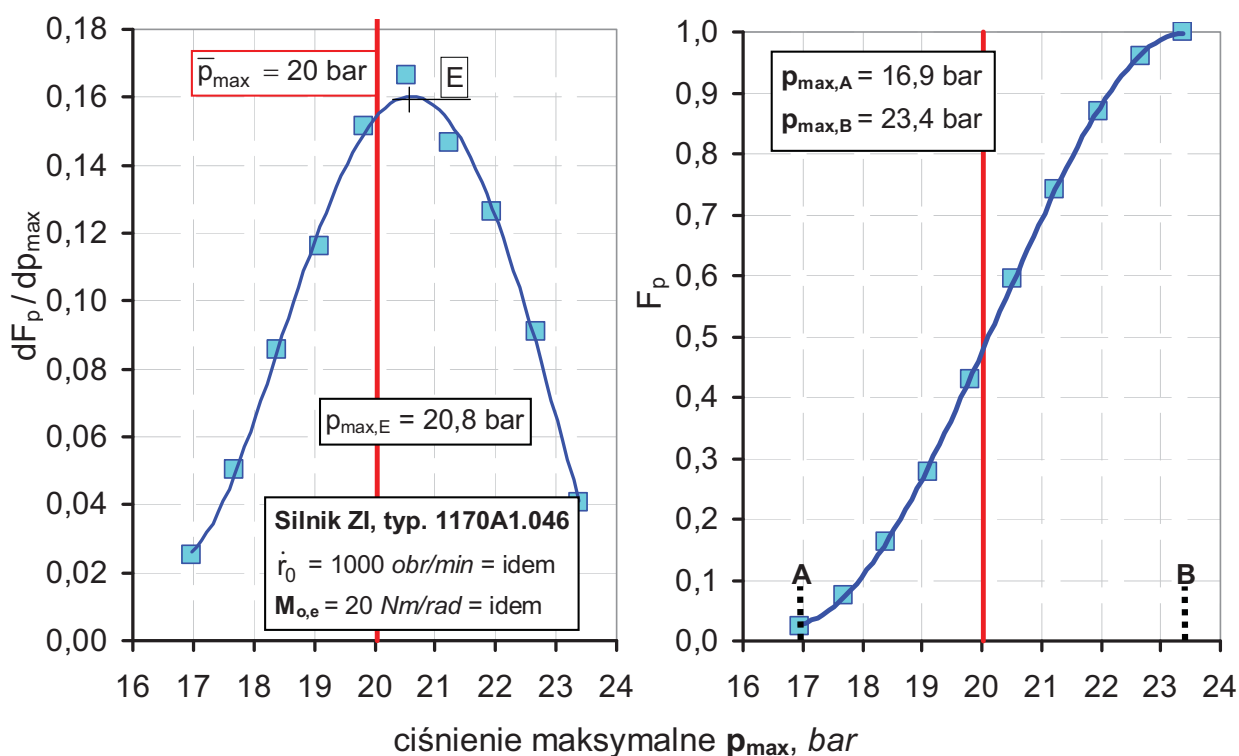
Na podstawie przytoczonych zależności (3), (4), wyznaczono funkcje gęstości oraz funkcje rozkładu ciśnienia maksymalnego p_{max} w cylindrze silnika (rysunki od Rys. 1 do Rys 7). W następnej kolejności zbadano kształtowanie się wskaźnika niepewtarzalności ciśnienia maksymalnego w zależności od obciążenia silnika spalinowego (Rys. 8).



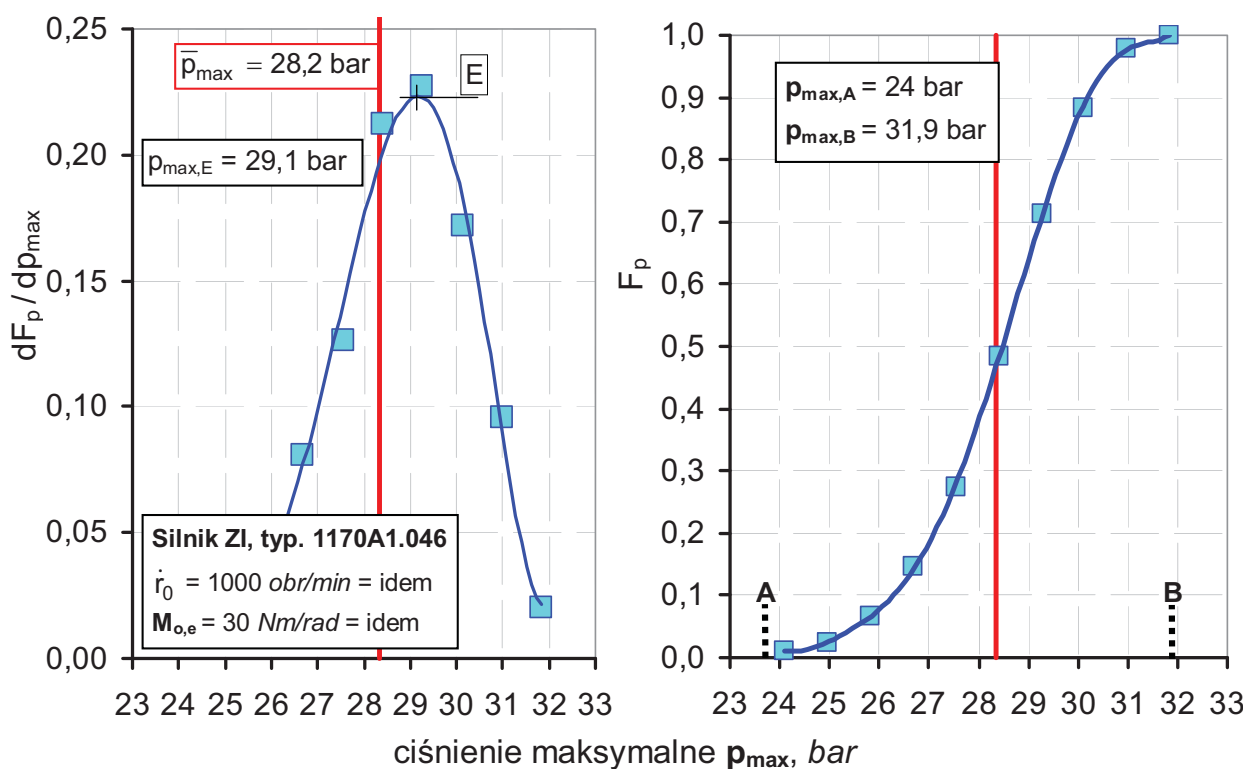
Rys. 1. Funkcja gęstości (dF_p/dp_{max}) oraz rozkładu F_p ciśnienia p_{max} w cylindrze silnika ZI (bieg luzem)
Fig. 1. Density (dF_p/dp_{max}) and distribution function of pressure p_{max} in cylinder SI engine (idling)



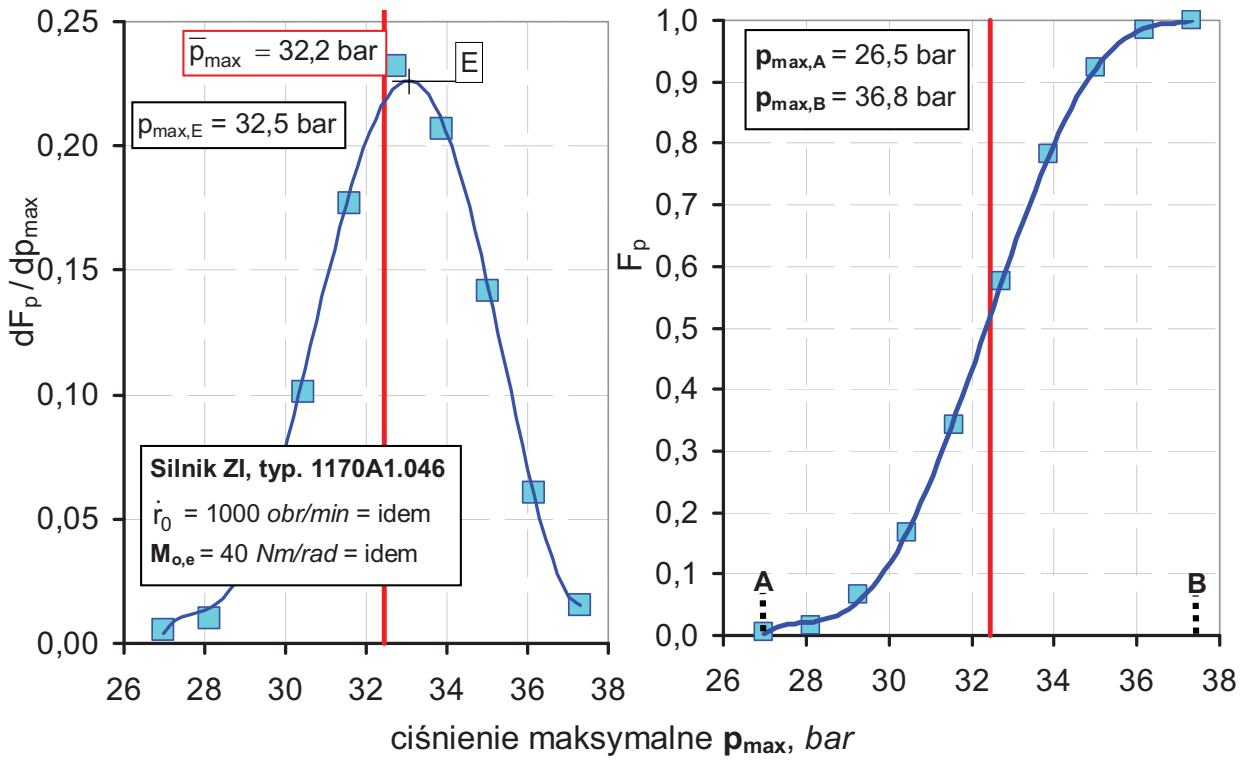
Rys. 2. Funkcja gęstości (dF_p/dp_{max}) oraz rozkładu F_p ciśnienia p_{max} w cylindrze silnika ZI (niskie obciążenie)
Fig. 2. Density (dF_p/dp_{max}) and distribution function of pressure p_{max} in cylinder SI engine (low load)



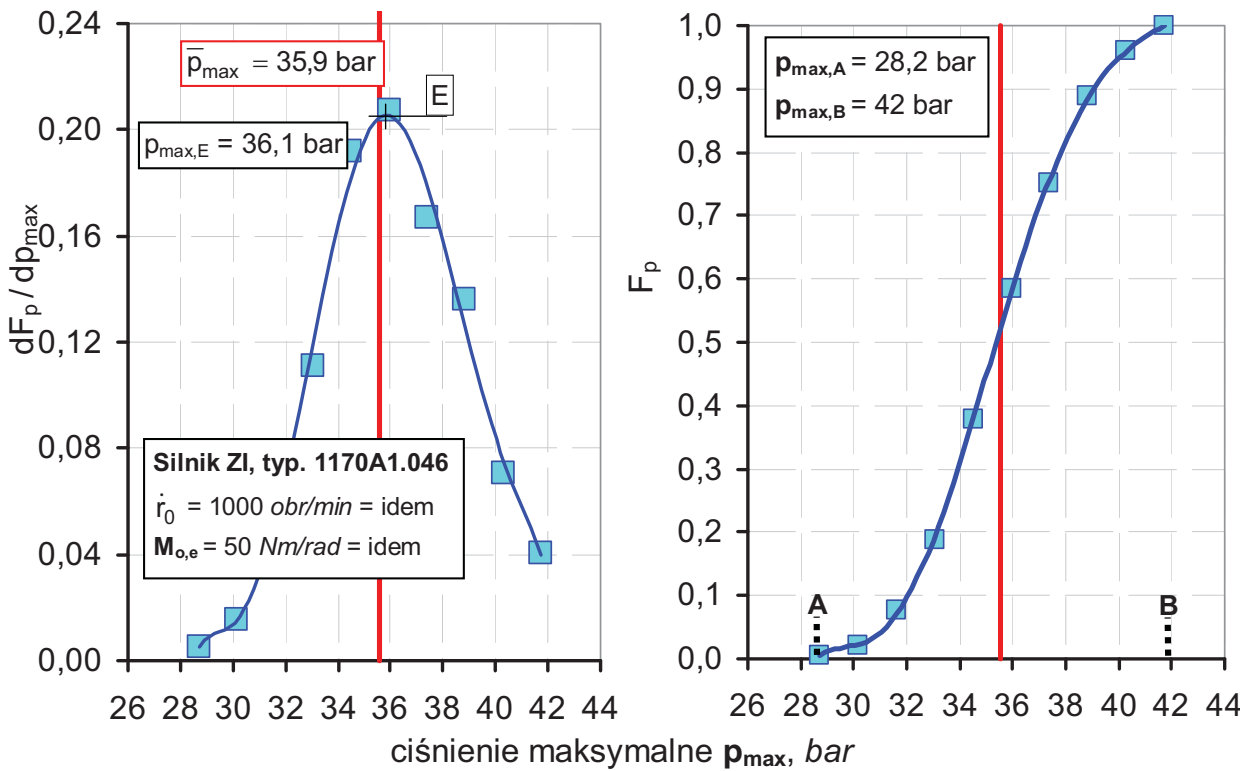
Rys. 3. Funkcja gęstości (dF_p/dp_{max}) oraz rozkładu F_p ciśnienia p_{max} w cylindrze silnika ZI ($M_{o,e} = 20$ Nm/rad)
 Fig. 3. Density (dF_p/dp_{max}) and distribution function of pressure p_{max} in cylinder SI engine ($M_{o,e} = 20$ Nm/rad)



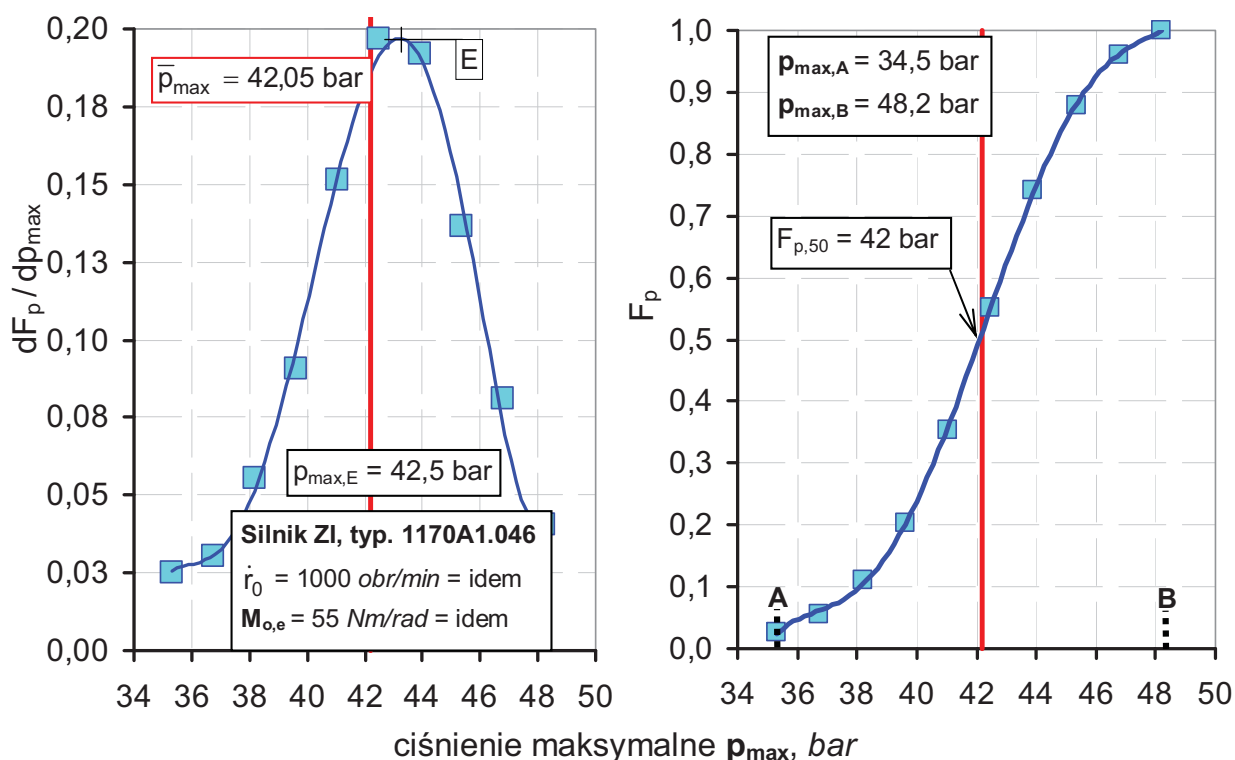
Rys. 4. Funkcja gęstości (dF_p/dp_{max}) oraz rozkładu F_p ciśnienia p_{max} w cylindrze silnika ZI ($M_{o,e} = 30$ Nm/rad)
 Fig. 4. Density (dF_p/dp_{max}) and distribution function of pressure p_{max} in cylinder SI engine ($M_{o,e} = 30$ Nm/rad)



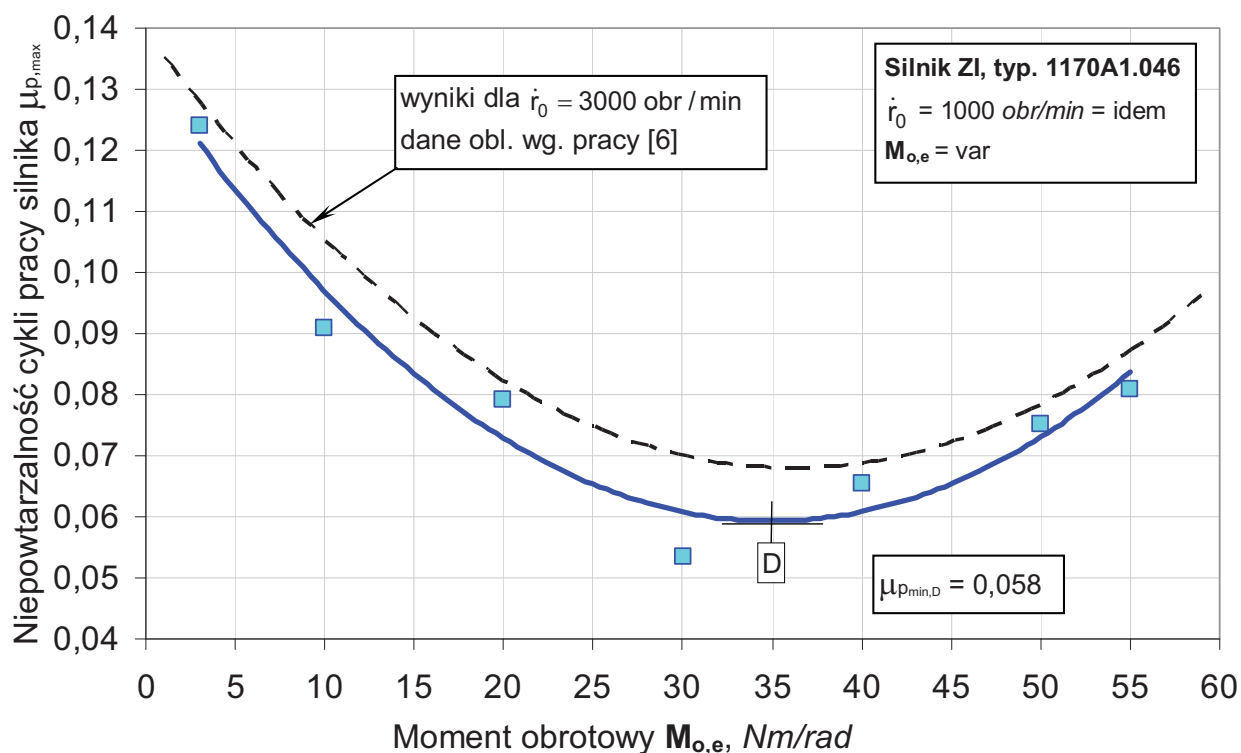
Rys. 5. Funkcja gęstości (dF_p/dp_{max}) oraz rozkładu F_p ciśnienia p_{max} w cylindrze silnika ZI ($M_{o,e} = 40 \text{ Nm/rad}$)
 Fig. 5. Density (dF_p/dp_{max}) and distribution function of pressure p_{max} in cylinder SI engine ($M_{o,e} = 40 \text{ Nm/rad}$)



Rys. 6. Funkcja gęstości (dF_p/dp_{max}) oraz rozkładu F_p ciśnienia p_{max} w cylindrze silnika ZI ($M_{o,e} = 50 \text{ Nm/rad}$)
 Fig. 6. Density (dF_p/dp_{max}) and distribution function of pressure p_{max} in cylinder SI engine ($M_{o,e} = 50 \text{ Nm/rad}$)



Rys. 7. Funkcja gęstości (dF_p/dp_{max}) oraz rozkładu F_p ciśnienia p_{max} w cylindrze silnika ZI (pełne obciążenie)
 Fig. 7. Density (dF_p/dp_{max}) and distribution function of pressure p_{max} in cylinder SI engine (full load)



Rys. 8. Niepowtarzalność kolejnych cykli pracy silnika spalinowego ZI w zależności od jego obciążenia
 Fig. 8. The working cycles unrepeatability of SI engine depending on his load

Analizując wyniki przedstawione na rysunkach od Rys. 1 do Rys. 7, wyraźnie zauważalne są różnice w przebiegu funkcji gęstości oraz rozkładu p_{max} , dla założonych wartości obciążenia silnika. Szczególnie interesujący jest przebieg tych funkcji, odpowiadający pracy silnika na biegu luzem (Rys. 1). Dla tego stanu pracy silnika, funkcja gęstości nie posiada wyraźnego ekstremum (pokrywa się ono z początkiem przedziału $p_{maxE} = p_{maxA}$). Niepowtarzalność cykli w tym punkcie

pracy silnika jest także największa (rys. 8).

Podczas pracy silnika przy wyższych obciążeniach, funkcje gęstości posiadają zbliżony do siebie kształt, dotyczy to również funkcji gęstości (rysunki od Rys. 2 do Rys. 7). W większości przypadków, maksimum funkcji gęstości, występuje w pobliżu średniej wartości ciśnienia maksymalnego \bar{p}_{\max} . Najniższe wartości niepowtarzalności cykli, mają miejsce podczas pracy silnika przy obciążeniach częściowych, wpływ prędkości okazuje się mniejszy porównując wyniki z rezultatami prezentowanymi w pracy [6] (Rys. 8).

4. Wnioski

Zaprezentowane wyniki stanowią rezultaty kolejnego etapu badań zjawiska niepowtarzalności cykli pracy silnika spalinowego. Celem przeprowadzonej analizy było określenie funkcji gęstości oraz rozkładu ciśnienia maksymalnego, podczas kolejnych cykli roboczych silnika pracującego przy niskiej prędkości obrotowej ($\dot{r}_0 = 1000 \text{ obr/min} = \text{idem}$).

Znajomość funkcji gęstości ciśnienia maksymalnego p_{\max} , pozwoli wyeliminować nieodpowiednie cykle pracy z zarejestrowanej serii pomiarowej. Uwzględnienie wartości ciśnienia p_{\max} jako zmiennej losowej, ma umożliwić dokładniejsze wyznaczenie reprezentatywnego cyklu pracy silnika, uśrednionego z wybranych danych pomiarowych.

Do określenia wpływu parametrów obciążenia silnika spalinowego na wartość ciśnienia maksymalnego w zebranych wykresach indykatorowych, badano wybrany fragment pola pracy ($M_o = \text{var}$, $\dot{r}_0 = 1000 \text{ obr/min} = \text{idem}$) silnika 117A1.046.

Literatura

- [1] Kowalewicz, A., Różycki, A., *Niepowtarzalność kolejnych cykli pracy silnika o ZI zasilanego ubogą mieszanką paliwowo – powietrzną*, Interkonmot 98, Teka Komisji Naukowo Problemowej Motoryzacji PAN, Kraków 1998.
- [2] Longwic, R., *Metodyka określania stopnia niepowtarzalności procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych*, KONMOT, Teka Komisji Motoryzacji PAN, Kraków 2005.
- [3] Markowski, M., Papuga, T., *Stochastyczny opis ciśnienia w przestrzeni roboczej silnika spalinowego*, Interkonmot 98, Teka Komisji Naukowo – Problemowej Motoryzacji PAN, Kraków 1998.
- [4] Merkisz, J., Grzeszczak, R., Boguś, P., *Wykrywanie zjawiska wypadania zapłonów na podstawie chwilowej wartości przyspieszenia kąowego wału silnika dla potrzeb systemów OBD i ich homologacji*, 28th International Scientific Conference on Combustion Engines, KONES'22, Jurata 2002.
- [5] Piernikarski, D., Hunicz, J., *Ocena poziomu wypadania zapłonów w silniku benzynowym na podstawie sygnału optycznego z komory spalania*, 25th International Scientific Conference on Combustion Engines, KONES'99, Zakopane 1999.
- [6] Przybyła, G., Postrzednik, S., *Wpływ parametrów obciążenia silnika spalinowego ZI na niepowtarzalność realizowanych cykli XIX. International Congress on Combustion Engines. PTNSS KONGRES-2007. Kraków, 2007. Silniki Spalinowe – wydanie specjalne.*