

## Charakterystyki procesów przejściowych silników spalinowych

KRZYSZTOF WITUSZYŃSKI, JACEK CZARNIGOWSKI

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Lubelska

W artykule przedstawiono stan wiedzy dotyczącej normalizacji badań silników spalinowych. Zaproponowano standaryzację badań silników w warunkach nieustalonych obejmującą zarówno warunki przeprowadzania pomiarów jak też standaryzację wielkości mierzonych. Przedstawiono także propozycję wielkości charakteryzujących przebieg procesów nieustalonych oraz zaproponowano przedstawianie przebiegu pracy silnika w stanach nieustalonych za pomocą charakterystyki procesów przejściowych. Rozważania teoretyczne uzupełniono o wyniki wstępnych badań procesów nieustalonych przeprowadzone na silnikach Polonez 1,5 SPI oraz Holden 2,0 MPFI.

### 1. Wstęp

Zwiększające się wymagania związane z ochroną środowiska i zaostrzająca się konkurencja na rynku samochodowym wymuszają stosowanie coraz doskonalszych konstrukcji silników oraz ich dopasowanie do modelu pojazdu, czyli do warunków eksploatacji. Wymagania te dotyczą nie tylko mocy, momentu obrotowego, zużycia paliwa i toksyczności spalin, ale także dynamiki silnika, jego zdolności do przyspieszenia.

Dobór silnika do danego pojazdu, jego optymalizacja oraz oceny odbiorcze i diagnostyczne tego silnika dokonywane są na podstawie znormalizowanych parametrów silnika. W polskim systemie normalizacyjnym, w dużej części zgodnym z normalizacją międzynarodową, istnieje wiele norm zajmujących się badaniami silników spalinowych. Normy te podane są w tabeli 1.

Normy dotyczące badań silników zajmują się opisem warunków, metod badań oraz określaniem wielkości służących do porównywania silników. Są to: prędkość obrotowa, moc, moment obrotowy, zużycie paliwa i zużycie oleju smarującego. Wszystkie te normy dotyczą badań silnika w stanach ustalonych, a więc przy stałej prędkości obrotowej (średniej prędkości obrotowej z kolejnych cykli mieszczących się w zakresie biegnów nierównomierności pracy silnika), stałym obciążeniu i ustalonych warunkach cieplnych silnika.

Jednocześnie, jak wykazały badania [6, 7], istotną część czasu pracy silnika stanowią stany nieustalone (przejściowe). W zależności od warunków zewnętrznych mogą one

Tabela 1. Normy dotyczące badań silników spalinowych.  
Table 1. List of norms on research of internal combustion engine

Numer normy	Nazwa normy	Numer odpowiednika międzynarodowego
PN-88/S-02005	Silniki spalinowe. Badania stanowiskowe. Wyznaczanie podstawowych parametrów pracy.	–
PN-80/M-34000	Silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym. Charakterystyki.	–
PN-91/M-36160	Silniki spalinowe tłokowe. Osiągi. Normalne warunki odniesienia oraz deklarowanie mocy, zużycia paliwa i zużycia oleju smarującego.	ISO 3046/1 – 1986
PN-91/M-36161	Silniki spalinowe tłokowe. Osiągi. Metody badań.	ISO 3046-2 – 1987
PN-91/M-36162	Silniki spalinowe tłokowe. Osiągi. Pomiary stanowiskowe.	ISO 3046-3 – 1989
PN-91/M-36163	Silniki spalinowe tłokowe. Osiągi. Regulacja prędkości obrotowej.	ISO 3046/IV – 1978
PN-91/M-36164	Silniki spalinowe tłokowe. Osiągi. Drgania skrętne.	ISO 3046/V – 1978
PN-91/M-36165	Silniki spalinowe tłokowe. Osiągi. Zabezpieczanie przed nadmierną prędkością obrotową.	ISO 3046-6 – 1990
PN-91/M-36166	Silniki spalinowe tłokowe. Osiągi. Oznaczenie mocy silnika.	ISO 3046-7 – 1987
PN-91/M-36180	Silniki spalinowe tłokowe. Określenie środka masy silnika.	–

stanowiąc około 30% czasu pracy silnika (jazda po autostradzie) lub nawet 95% (jazda w mieście). Mimo to silniki nadal porównywane są na podstawie parametrów otrzymanych w trakcie badań w stanach ustalonych.

Coraz częściej podejmowane są badania zachowania się silnika w stanach nieustalonych, ale zarówno sposób przeprowadzania tych badań jak też ich wyniki nie są poddane standaryzacji i przez to nie są wykorzystywane do porównywania silników. Do najbardziej rozpowszechnionej metody wykorzystania tych badań należy określanie sprawności mechanicznej silnika metodą wybiegu [2, 5], w której wykorzystywane jest wymuszenie za pomocą skoku jednostkowego elementu sterującego. Jednocześnie badania silnika w stanach nieustalonych wykorzystywane są do oceny diagnostycznej silnika.

## 2. Standaryzacja badań w warunkach nieustalonych

W ostatnich latach widoczna jest zwiększona ilość i wzrost wagi badań silników spalinowych w warunkach nieustalonych. Jednocześnie nie zostało to poparte przez standaryzację warunków przeprowadzenia pomiarów w stanach nieustalonych (przejściowych). Dodatkowo nie istnieją też sposoby oceny i porównywania dynamiki silników spalinowych.

Dlatego też autorzy proponują badania **charakterystyk procesów przejściowych** silników, czyli odpowiedź układu „silnik — odbiornik” na skokową zmianę położenia

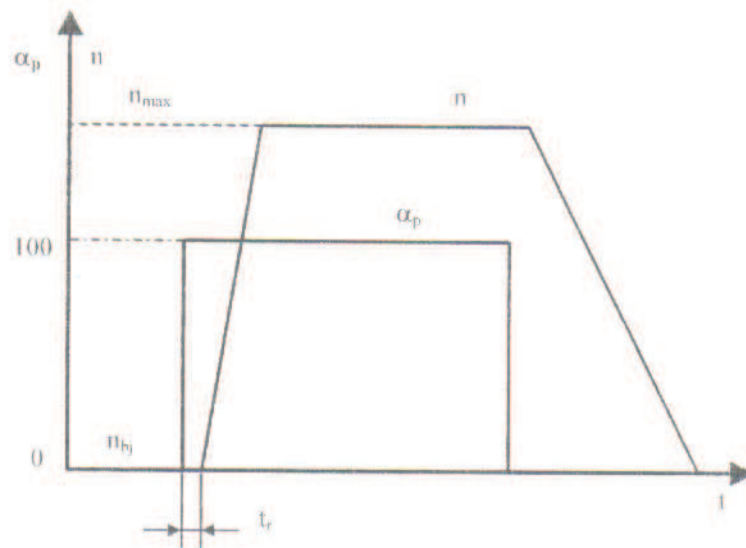


Fig. 1. Schemat tworzenia charakterystyki procesów przejściowych.  $\alpha_p$  — stopień zasilania (stopień otwarcia przepustnicy),  $n$  — prędkość obrotowa [obr/min],  $t_r$  — czas reakcji silnika [s].

Fig. 1. Scheme of creation transient processes characteristic:  $\alpha_p$  — degree of power supply (throttle position),  $n$  — engine speed [RPM],  $t_r$  — engine reaction time [s]

elementu sterującego, przy czym zmiana prędkości obrotowej następuje do czasu uzyskania równowagi momentów: obrotowego silnika i odbiornika mocy (podczas biegu luzem za „odbiornik” możemy uważać opory własne biegu silnika).

Badania powinny obejmować charakterystyki:

- a) ze względu na wielkość skoku elementu sterującego:
  - skok całkowity (przesunięcie elementu sterującego z położenia biegu jałowego do położenia maksymalnego),
  - skoki częściowe (np. 30–100%, 0–50%),
- b) ze względu na obciążenie silnika:
  - bieg luzem,
  - z dołączanym obciążeniem.

Konieczna jest też standaryzacja warunków przeprowadzenia badań charakterystyk procesów przejściowych obejmująca:

#### 1. Warunki pomiaru:

- Pomiar w celu uzyskania charakterystyk procesów przejściowych powinny być przeprowadzane na stanowisku hamownianym. Dopuszczalne jest przeprowadzenie badań silnika zamontowanego w pojeździe, przy czym silnik powinien być w czasie próby wysprzęglony.
- Próba powinna być poprzedzona, uznanym przez wytwórcę za odpowiedni, okresem docierania.
- Pomiar powinien być wykonywany jedynie wówczas, gdy silnik osiągnie warunki pracy ustalonej tak, jak to zakłada wytwórca. Kolejny pomiar może być wykonany jedynie po powrocie silnika do warunków stanu ustalonego.

- Badaniom poddaje się silnik wyposażony w zależne urządzenia pomocnicze, niezbędne do jego pracy.
- Silnik poddany badaniom musi być wyposażony w ogranicznik prędkości obrotowej, zabezpieczający go przed przekroczeniem maksymalnej dopuszczalnej prędkości obrotowej.
- Podczas badań nie należy wykonywać żadnych dodatkowych pomiarów poza tymi, które są wymagane do utrzymania warunków badań oraz tymi, które są wymagane do normalnej pracy silnika zgodnie z instrukcją obsługi.
- W przypadku silników wielopaliwowych próba jest prowadzona przy zasilaniu paliwem ciekłym. Dodatkowa próba przy zasilaniu paliwem gazowym może być przeprowadzona, przy czym konieczne jest określenie własności zapłonowych paliwa i podanie tego razem z wynikami.
- W odniesieniu do metody pomiarów stosowanych podczas prób stosuje się symbole mierzonych parametrów, jednostki itd. — zgodnie z ISO 3046-3 (idt. PN-91/M-36162).
- Jeżeli stosuje się przyrządy pomiarowe, które drukują bądź przechowują w pamięci mierzone wielkości, wówczas drukowane i/lub przechowywane wielkości powinny być jednocześnie wyświetlane w trakcie badań.

### II. Wielkości mierzone:

Prędkość obrotowa powinna być mierzona z dokładnością co najmniej  $\pm 2\%$ , a pomiar powinien odbywać się co  $180^\circ$  OWK (większa dokładność nie jest wskazana ze względu na wprowadzanie do pomiarów zmienności prędkości obrotowej silnika w czasie obrotu, wynikającej z cyklicznego charakteru pracy silnika).

### III. Wielkości określane:

- Charakterystyka procesów przejściowych — wykres przyspieszenia w funkcji prędkości obrotowej. Czas reakcji silnika na początek ruchu elementu sterującego  $t_r$  — czas pomiędzy początkiem ruchu elementu sterującego a początkiem odpowiedzi układu (wzrostem prędkości obrotowej).
- Współczynnik akceleracji  $k_a$ :

$$k_a = \frac{n_{\max} - n_{\text{pocz}}}{i_a} [\text{s}^{-1}]$$

gdzie:

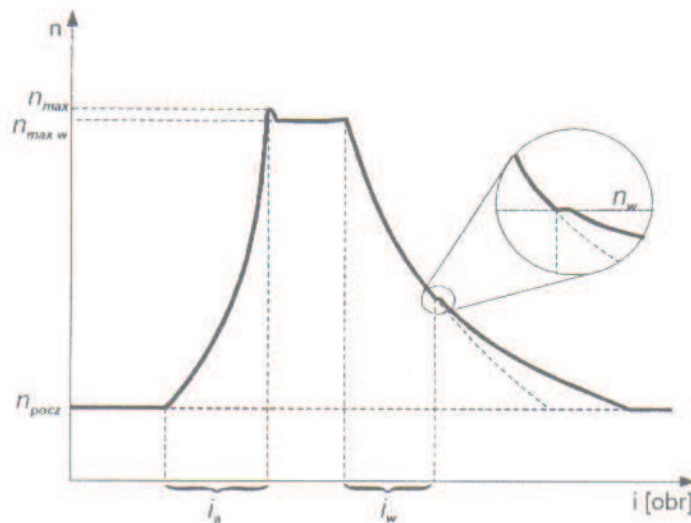
- $n_{\max}$  — prędkość maksymalna uzyskana przez silnik podczas rozpędzania [obr/min];
- $n_{\text{pocz}}$  — prędkość początkowa próby [obr/min];
- $i_a$  — liczba obrotów rozpędzania silnika (pomiędzy prędkością  $n_{\text{pocz}}$  a prędkością  $n_{\max}$ ).

- Współczynnik wybiegu  $k_w$ :

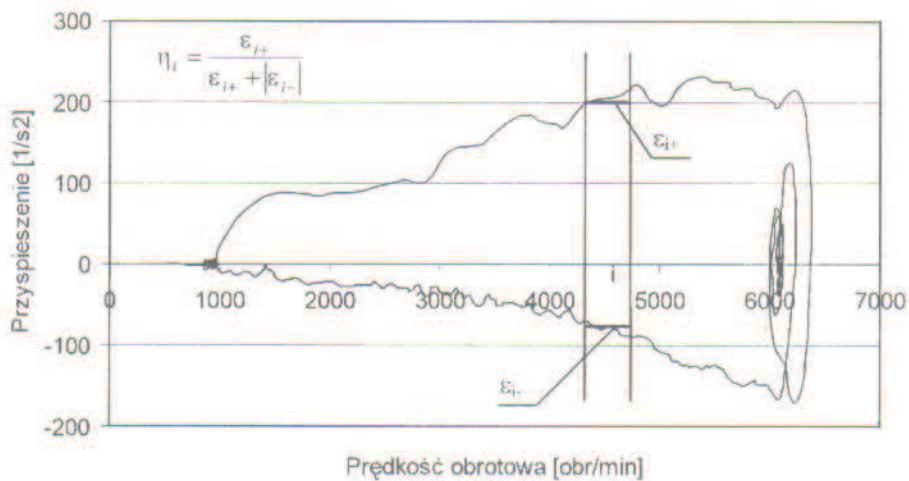
$$k_w = \frac{n_{\max w} - n_w}{i_w} [\text{s}^{-1}]$$

gdzie:

- $n_{maxw}$  — prędkość początkowa wybiegu [obr/min];
- $n_w$  — prędkość rozpoczęcia regulacji biegu jałowego (prędkość załamania krzywej wybiegu w postaci utrzymania prędkości obrotowej przez co najmniej 1 obrót) [obr/min];
- $i_w$  — liczba obrotów wybiegu silnika (pomiędzy prędkościami  $n_{maxw}$  i  $n_w$ ).



Rys. 2. Sposób wyznaczania współczynników akceleracji i wybiegu.  
Fig. 2. Procedure of determinate of acceleration and deceleration coefficients



Rys. 3. Schemat wyznaczania sprawności mechanicznej silnika.  
Fig. 3. Procedure of determinate of mechanical efficiency

- Przyspieszenie maksymalne  $\varepsilon_{\max}$  i prędkości obrotowa odpowiadająca temu przyspieszeniu  $n_{\varepsilon_{\max}}$
- Maksymalna sprawność mechaniczna  $\eta_{m\max}$  i prędkość odpowiadająca tej sprawności  $n_{\eta_{\max}}$ . Sprawność wyznaczana jest ze wzoru:

$$\eta_{mi} = \frac{N_{ei}}{N_{ei} + N_{mi}} \cong \frac{\varepsilon_{i+}}{\varepsilon_{i+} + |\varepsilon_{i-}|}$$

gdzie:

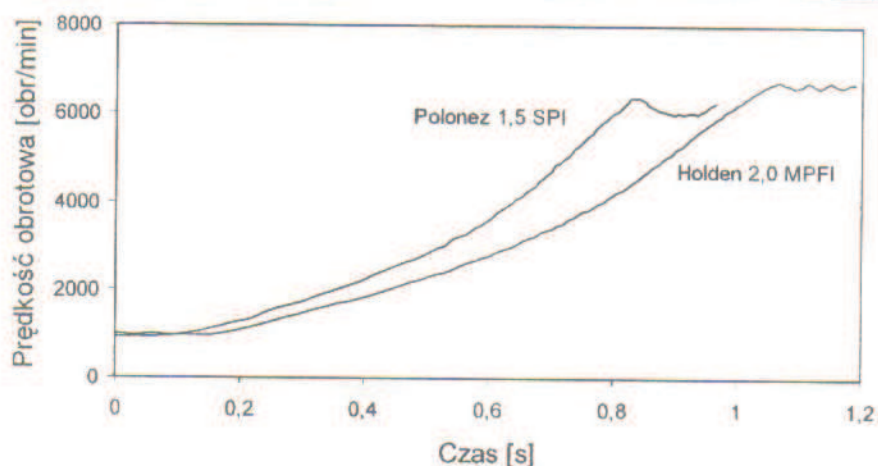
- $\eta_{mi}$  — sprawność mechaniczna dla  $i$ -tego przedziału prędkości obrotowej (w obliczeniach przyjęto wielkość tego przedziału na 50 obr/min),
- $N_{ei}$  — moc użyteczna dla  $i$ -tego przedziału prędkości,
- $N_{mi}$  — moc tracona na pokonanie oporów mechanicznych dla  $i$ -tego przedziału prędkości obrotowej,
- $\varepsilon_{i+}$  — średnie dodatnie przyspieszenie dla  $i$ -tego przedziału prędkości obrotowej,
- $\varepsilon_{i-}$  — średnie ujemne przyspieszenie dla  $i$ -tego przedziału prędkości obrotowej.

### 3. Wyniki badań

Wyniki wstępnych badań charakterystyk procesów przejściowych przeprowadzonych przez autorów na dwóch silnikach: Polonez 1,5 SPI i Holden 2,0 MPFI wskazują na różnicowanie własności dynamicznych obu silników.

Tabela 2. Parametry techniczne obiektów badań.  
Table 2. Technical parameters of tested engine

	Polonez 1,5 SPI	Holden 2,0 MPFI
data produkcji	1992	1997
pojemność skokowa [cm <sup>3</sup> ]	1481	1998
układ i liczba cylindrów	rzędowy, czterocylindrowy	rzędowy, czterocylindrowy
średnica/skok tłoka [mm]	77/79,5	86/86
stopień sprężania	9,2	8,8
liczba zaworów na cylinder	2	2
moc maksymalna moment maksymalny	57 kW przy 5300 obr/min 115 Nm przy 2800 obr/min	77 kW przy 5200 obr/min 164 Nm przy 2600 obr/min
układ zasilania	jednopunktowy wtrysk benzyny firmy MULTEC ACG TBI 700 firmy AC Rochester	wielopunktowy wtrysk benzyny ACDS firmy DELPHI
układ zapłonowy	bezrozdzielaczowy, mikroprocesorowy, świece zapłonowe ISKRA FE65PS, odstęp elektrod 0,8 mm	bezrozdzielaczowy, mikroprocesorowy, świece zapłonowe R43 XLS DELCO, odstęp elektrod 1-1,1 mm



Rys. 4. Porównanie czasu reakcji i przebiegu rozpędzania badanych silników.  
Fig. 4. Comparison of reaction time and acceleration of tested engine

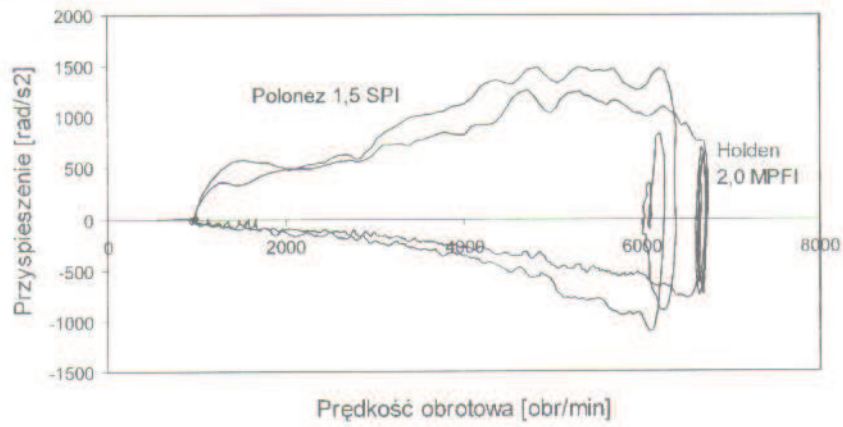
Tabela 3. Wyniki badań.  
Table 3. Testing results

	Czas reakcji $t_r$ [s]	Współczynnik akceleracji $k_a$	Współczynnik wybiegu $k_w$	
Polonez 1,5 SPI	0,10	155	49	
Holden 2,0 MPFI	0,14	120	38	
	Maksymalne przyspieszenie $\varepsilon_{max}$ [rad/s <sup>2</sup> ]	Prędkość przyspieszenia maksymalnego $n_{\varepsilon max}$ [obr/min]	Maksymalna sprawność mechaniczna $\eta_{m max}$	Prędkość sprawności maksymalnej $n_{\eta max}$ [obr/min]
Polonez 1,5 SPI	1430	5650	0,79	2400
Holden 2,0 MPFI	1150	5350	0,81	2400

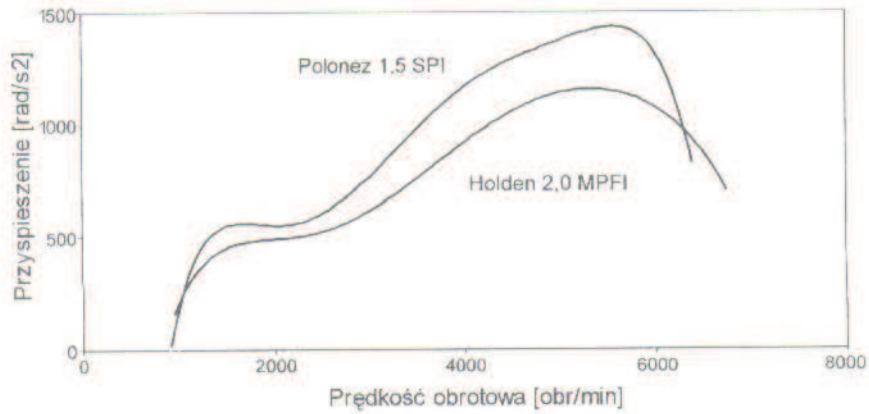
Na rysunku 4 i w tabeli 3 przedstawiono wyniki rozpędzania obu silników. Większą dynamikę posiada tutaj silnik Polonez 1,5 SPI. Widoczne jest to zarówno w większej wartości współczynnika akceleracji (155-Polonez, 120-Holden), jak też w większym maksymalnym przyspieszeniu (tabela 3). Wartość maksymalnego przyspieszenia odczytano z rys. 6, otrzymanego poprzez uśrednienie 50 charakterystyk procesów przejściowych.

Silnik Polonez 1,5 SPI posiada także krótszy czas reakcji niż silnik Holden 2,0 MPFI. Różnica ta może jednak wynikać ze sposobu przeprowadzenia badań, ze względu na większą długość elementów łączących pedał przyspiesznika, którego ruch wyzwał zapis, z przepustnicą w przypadku silnika Holden.

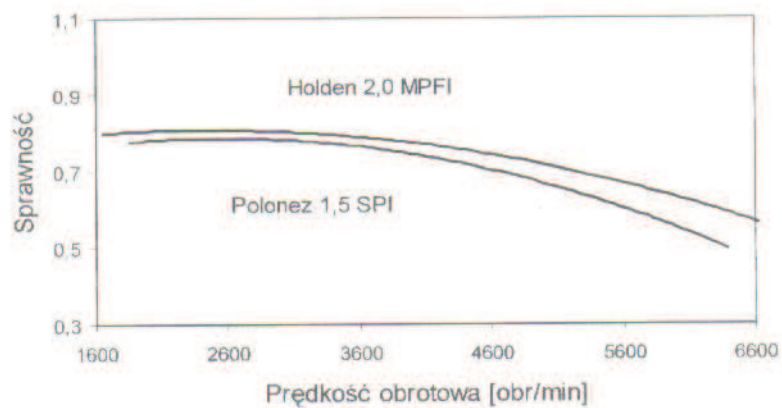
Przewaga silnika Holden widoczna jest natomiast w sprawności mechanicznej (rys. 7). Mniejsze opory wewnętrzne nowszej konstrukcji silnika Holden niż silnika Polonez 1,5 SPI, spowodowały, że w całym zakresie prędkości obrotowej sprawność mechaniczna silnika Holden 2,0 MPFI jest większa niż silnika Polonez 1,5 SPI.



Rys. 5. Charakterystyki procesów przejściowych badanych silników.  
Fig. 5. Transient processes characteristics of tested engine



Rys. 6. Porównanie przebiegu przyspieszenia przy rozpędzaniu badanych silników.  
Fig. 6. Comparison of acceleration of tested engine



Rys. 7. Porównanie przebiegu sprawności mechanicznej badanych silników.  
Fig. 7. Comparison of mechanical efficiency of tested engine



#### 4. Podsumowanie

W obecnym okresie wzrost zainteresowania i nacisk na badania silników w warunkach nieustalonych wymusza stosowanie badań silnika w tych warunkach. Konieczna jest więc standaryzacja warunków ich przeprowadzania oraz określenie parametrów porównawczych dynamiki silników. Przeprowadzone badania wykazują, że zaproponowane przez autorów wielkości i sposób standaryzacji są odpowiednie do tego celu.

#### 5. Literatura

- [1] CICHY M.: *Badanie silników samochodowych w stanach nieustalonych za pomocą wymuszeń sygnałem zdeterminowanym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Mechanika XIII, Gdańsk 1971.
- [2] *Laboratorium silników spalinowych*, Politechnika Lubelska, Lublin 1996.
- [3] KIERNICKI Z.: *Zastosowanie metody inercyjnej do oceny stany technicznego silników spalinowych*. Rozprawa doktorska, Akademia Rolnicza w Lublinie, Lublin 1991.
- [4] PIĘTAK A.: *Charakterystyki dynamiczne silników o zapłonie samoczynnym i ich aplikacje diagnostyczne*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1998.
- [5] PRYCIASZEK A., TRYBULA W.: *Opracowanie metodyki badania diagnostycznego efektywności pracy i strat wewnętrznych silnika 166c-076*. Rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1978.
- [6] WENDEKER M., LATALSKI J.: *Próba statystycznej oceny wybranych parametrów pracy samochodowego silnika benzynowego*, Konmot'96, 1996 str. 233–245.
- [7] WITUSZYŃSKI K.: *Prędkość kątowna i moment obrotowy jako nośniki informacji o stanie silnika spalinowego. Studium teoretyczno-eksperymentalne*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1996.

#### Transient processes characteristics of internal combustion engine

##### Summary

The article presents the state of knowledge concerning the studies of engine's research in steady-state conditions including both the conditions of measures as well as the standardization of measured parameters. The proposal of parameters characterizing the engine's work in dynamic-states has been proposed by means of characterizing the transient processes. Theoretical discussion has been supplemented by the preliminary results of investigation of the transient processes made on the engine of Polonez 1,5 SPI and Holden 2,0 MPFI.