

Dariusz PIETRAS

AKADEMIA TECHNICZNO – HUMANISTYCZNA BIELSKO - BIAŁA

Analiza porównawcza procedur zadawania momentu obrotowego na hamowni silnikowej

Dr inż. Dariusz PIETRAS

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, dyplom w zakresie silników spalinowych. Stopień doktora uzyskał w 2003 r. w dyscyplinie budowa i eksploatacja Maszyn. Jest adiunktem na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, w Zakładzie Silników Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów. Zajmuje się zagadnieniami sterowania silników, badań silników, modelowania procesów silnikowych.

e-mail: pietras@ath.bielsko.pl



Streszczenie

Współczesne silnikowe stanowiska hamownicze stwarzają szerokie możliwości w symulowaniu rzeczywistych warunków pracy badanych silników oraz zapewniają szerokie możliwości pomiarowe z wykorzystaniem bardzo specjalistycznego sprzętu pomiarowego. Dokładność utrzymywania przez hamulec zadanych nastaw regulacyjnych: prędkości obrotowej oraz obciążenia istotnie wpływa na wyniki realizowanych badań doświadczalnych, dla których wymagana jest duża powtarzalność i dokładność pomiarowa. W artykule przedstawiono analizę porównawczą dwóch procedur badawczych: zadawania momentu oraz zadawania przyspieszenia, stosowanych w badaniach silników na stanowisku hamowniczym z punktu widzenia ich wpływu na wskaźniki pracy silnika, zawartość składników spalin i zadymienie. Ponadto omówione zostało stanowisko badawcze, oraz system sterowania hamownią.

Słowa kluczowe: hamownia silnikowa, badania silników.

Comparative analysis of procedures for engine torque control on a test bench

Abstract

Strict requirements of the exhaust emission standards as well as the ongoing drive towards fuel consumption reduction, while improving performance, are the main modern development goals placed on internal combustion engines manufacturers. Addressing this task requires the use of sophisticated research instruments of high accuracy for scientific investigations and development work. Hence, a well chosen engine test bench is also very important. Modern engine test benches create significant opportunities for simulating real working conditions of the engine under investigation, and ensure the extensive measurements capabilities, using highly specialised measuring equipment. The controlling accuracy of engine dynamometer parameters (such as rotational speed and load) influences significantly the results of experimental studies carried out for which high repeatability and accuracy of measurements are required. The paper presents a comparative analysis of two test procedures: torque and acceleration control, both of which are used for engine investigations, in terms of their impact on the indices of engine operation, exhaust emissions and smoke. The engine test bench and the dynamometer control system are also discussed.

Keywords: test bench, engine tests.

1. Wstęp

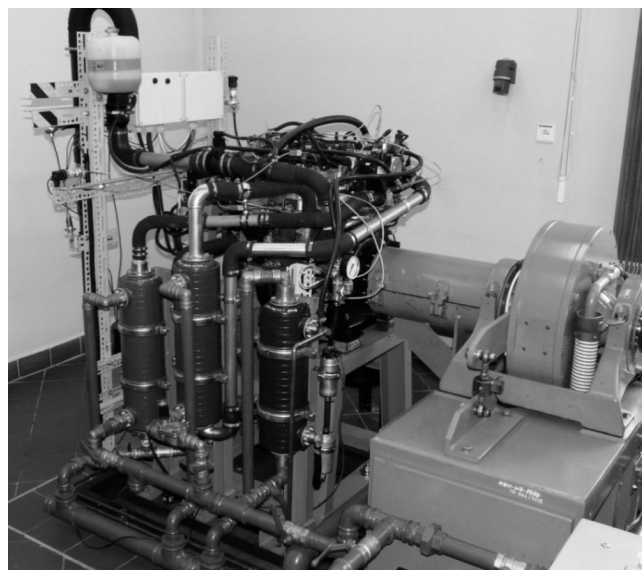
Wysokie wymagania w zakresie emisji szkodliwych składników spalin do środowiska jak również ciągłe dążenie do zmniejszania zużycia paliwa przy jednoczesnym podnoszeniu osiągnięć to główne cele rozwojowe stawiane producentom współczesnych silników spalinowych. Sprostanie tym zadaniom wymaga zastosowania w prowadzonych badaniach rozwojowych specjalistycznej aparatury badawczo pomiarowej o wysokich parametrach pomiarowych. Bardzo istotnym w tym momencie staje się również odpowiednio dobrane stanowisko hamownicze.

Współczesne silnikowe stanowiska hamownicze stwarzają szerokie możliwości w symulowaniu rzeczywistych warunków pracy badanych silników oraz zapewniają szerokie możliwości pomiarowe z wykorzystaniem już wspomnianego bardzo specjalistycznego sprzętu pomiarowego. Dokładność utrzymywania przez hamulec zadanych nastaw regulacyjnych: prędkości obrotowej oraz obciążenia istotnie wpływa na wyniki realizowanych badań doświadczalnych, dla których wymagana jest duża powtarzalność i dokładność pomiarowa.

Celem prac przedstawionych w artykule była analiza porównawcza dwóch procedur badawczych zadawania obciążenia silnika: zadawania momentu oraz zadawania przyspieszenia, stosowanych w badaniach silników na stanowisku hamowniczym z punktu widzenia ich wpływu na wskaźniki pracy silnika, zawartość składników spalin i zadymienie.

2. Stanowisko badawcze, program i obiekt badań

Stanowisko badawcze znajduje się w laboratorium Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Silnik zabudowany na stanowisku badawczym jest połączony z hamulcem elektrowirowym Schenck W130. Widok silnika i stanowiska badawczego przedstawia rysunek 1.



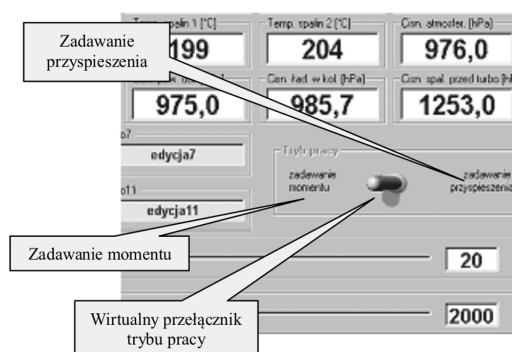
Rys. 1. Widok stanowiska badawczego
Fig. 1. View of the test bench

Najważniejszym elementem systemu hamowni jest sterownik hamulca zarządzany przez specjalny program opracowany i wykonany we współpracy z firmą „ADEL”. Regulacja zarówno zadanej prędkości obrotowej jak i zadanego obciążenia silnika realizowana jest w oparciu o regulatory PID, których wartości współczynników dobierane są empirycznie. Procedura doboru współczynników jest bardzo żmudna, a jej efektem końcowym jest stabilne utrzymywanie wartości prędkości obrotowej z dokładnością poniżej 1% oraz momentu obrotowego z dokładnością poniżej 3%. Tak wysoka dokładność zapewnia realizację badań doświadczalnych, dla których wymagana jest duża powtarzalność i dokładność pomiarowa.

Program sterowania pracą hamowni umożliwia zadawanie żądanego obciążenia silnika w dwóch różnych procedurach. Wybranie żądanej procedury umożliwia wirtualny przełącznik pokazany na rysunku 2, sterowany ręcznie za pomocą myszki komputerowej. Jedną z dwóch możliwych do wybrania procedur pracy jest bezpośrednio zadawanie momentu obrotowego wytwarzanego przez silnik będący obiektem badań. W celu zrealizowania tej procedury program przełącza regulację obciążenia silnika w sterowniku hamulca na tryb „stałomomentowy” „ $M_0 = idem$ ”. W celu utrzymania zadanej wartości momentu obrotowego, sterownik hamulca reguluje „wirtualny pedał przyspieszenia” czyli sygnał przekazywany do sterownika silnika w celu zapewnienia odpowiedniej dawki paliwa niezbędnej do wytworzenia przez silnik zadanego momentu obrotowego. Taki tryb nadążnej regulacji silnika w celu utrzymania na poziomie bliskim zeru uchybu momentu może powodować nadmierną emisję spalin oraz zwiększyć zużycie paliwa. Te właśnie przyczyny stały się głównym przedmiotem opisanych w artykule badań. Procedura zadawania bezpośrednio momentu obrotowego pomimo potencjalnych wad opisanych powyżej jest bardzo wygodna do stosowania w badaniach silnikowych, szczególnie przy wykonywaniu charakterystyk obciążeniowych silnika.

Drugą metodą realizacji obciążenia silnika na hamowni silnikowej jest procedura zadawania przyspieszenia. Po wybraniu odpowiedniej opcji w programie zarządzania hamownią w sterowniku hamowni przełącza się tryb regulacji na „wirtualny pedał przyspieszenia”. Stąd sygnał przekazywany jest bezpośrednio do sterownika silnika w celu odpowiedniego wysterowania silnika. Moment obrotowy wytwarzany w tym przypadku przez silnik jest zależny od położenia „wirtualnego pedału przyspieszenia”. Ta procedura badawcza najczęściej jest wykorzystywana w celu wykonywania charakterystyk prędkościowych silnika oraz w badaniach optymalizacyjnych, w których moment obrotowy, a co za tym idzie sprawność silnika jest wynikiem odpowiednich regulacji sterowania silnika.

W obydwu procedurach zadawanie żądanej wartości realizowane jest odpowiednim wskaźnikiem suwakowym w programie zarządzania hamownią.



Rys. 2. Widok opcji wyboru trybu pracy w programie zarządzania hamownią
Fig. 2. Mode selection options in management of the test bench

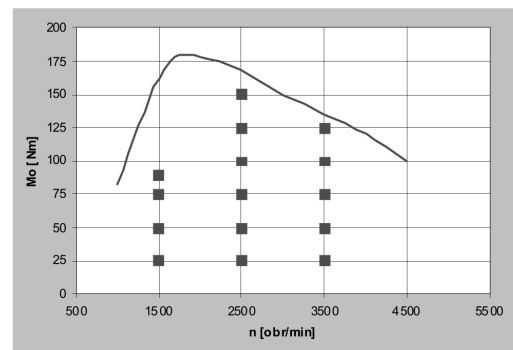
Badania przeprowadzone na hamowni silnikowej polegały na pomiarze wskaźników pracy silnika, składników spalin, zadymienia spalin, dla dwóch różnych procedur zadawania momentu.

Pomiary wykonano dla trzech prędkości obrotowych i różnych wartości obciążenia. Schemat przebiegu badań z naniesionymi punktami pomiarowymi został przedstawiony na rysunku 3.

Pierwszy pomiar wykonano dla procedury zadawania przyspieszenia dla prędkości 1500 obr/min i obciążenia 25 Nm, następnie przełącznik zadawania trybu pracy został ustawiony w tryb procedury zadawania momentu i wykonano pomiar dla tego samego punktu. Po wykonaniu pomiaru wirtualny przełącznik został w niezmiennym położeniu i wykonano pomiar według procedury zadawania momentu dla prędkości 1500 obr/min i obciążenia 50 Nm, następnie wirtualny przełącznik trybu zadawania pracy

został ustawiony w pozycji zadawania przyspieszenia i dokonano pomiaru dla tego samego punktu pomiarowego. Analogicznie postępowano w kolejnych punktach pomiarowych. W każdym punkcie pomiarowym, po ustabilizowaniu się parametrów pracy silnika, następowała automatyczna rejestracja danych trwająca 60 sekund z krokiem czasowym wynoszącym 1 sekundę.

Mierzone wartości zapisywane były w dwóch plikach. W pierwszym znajdowały się dane zapisane przez system akwizycji i sterowania hamownią silnikową. Natomiast w drugim pliku znajdowały się wartości archiwizowane przez program służący do monitoringu jednostki sterującej silnika.



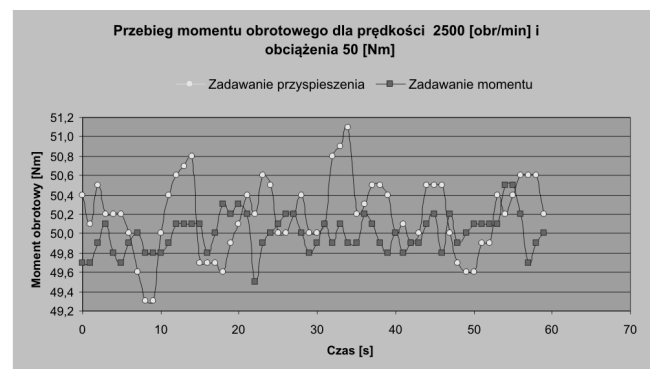
Rys. 3. Graficzne przedstawienie punktów pomiarowych na tle charakterystyki silnika
Fig. 3. Measurement points within the engine work range

3. Wyniki pomiarów i ich analiza

W oparciu o przedstawiony program badań przeprowadzono pomiary, których wyniki zestawiono w tabelach oraz zilustrowano na wykresach. Z uwagi na ograniczoną ilość miejsca w artykule przedstawiono jedynie wyniki w postaci wykresów dla dwóch punktów pomiarowych odpowiadających prędkości obrotowej 2500 obr/min, dla momentu obrotowego wynoszącego 50 i 150 Nm.

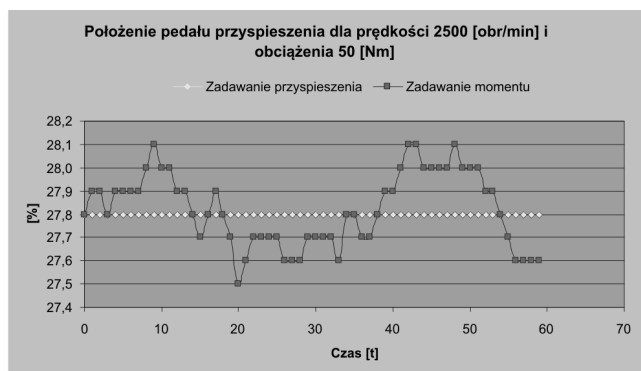
Przedstawione zostały wykresy porównawcze wskaźników pracy silnika, zawartości składników spalin i zadymienia spalin obiektu badań w funkcji czasu dla zadanej prędkości obrotowej i zadanej obciążenia. Na wszystkich wykresach znajdują się dwie linie, ze znacznikiem okrągłym zaznaczono przebieg wielkości podczas procedury zadawania przyspieszenia, natomiast ze znacznikiem kwadratowym oznaczono przebiegi wartości podczas procedury zadawania momentu.

Na rysunkach 4-8 przedstawiono wykresy porównawcze wielkości mierzonych dla badanych procedur zadawania obciążenia silnika dla prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążenia 50 Nm.



Rys. 4. Przebieg momentu obrotowego w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 50 Nm
Fig. 4. Torque vs. time for speed 2500 rpm and load 50 Nm

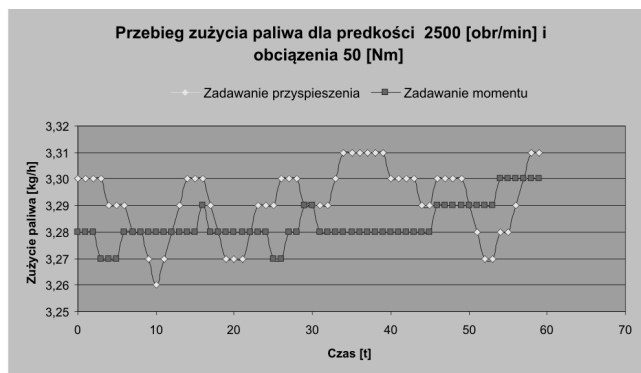
Na rysunku 4 przedstawiono wykres przebiegu momentu obrotowego w funkcji czasu. Występują widoczne wahania momentu obrotowego dla procedury zadawania przyspieszenia natomiast dla procedury zadawania momentu jego przebieg odznacza się większą stabilnością, a jego regulacja mieści się w zakresie 1 Nm co odpowiada dokładności 2%.



Rys. 5. Położenie wirtualnego pedału przyspieszenia w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 50 Nm

Fig. 5. Position of the accelerator vs. time for speed 2500 rpm and load 50 Nm

Na rysunku 5 przedstawiony jest wykres przebiegu położenia pedału przyspieszenia w funkcji czasu. Zgodnie z metodą badawczą dla procedury zadawania przyspieszenia, pedał pozostał ustawiony w zadanym położeniu przez cały czas próby, odzwierciedla to linia ze znacznikiem okrągłym, natomiast w przypadku procedury zadawania momentu, zmieniła swoją wartość, co wynika bezpośrednio z założenia tej procedury badawczej (linia w ze znacznikiem kwadratowym). Jak można zaobserwować przebieg położenia wirtualnego pedału przyspieszenia dla procedury zadawania momentu oscylował wokół 27,8 % wartości maksymalnej.



Rys. 6. Przebieg zużycia paliwa w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 50 Nm

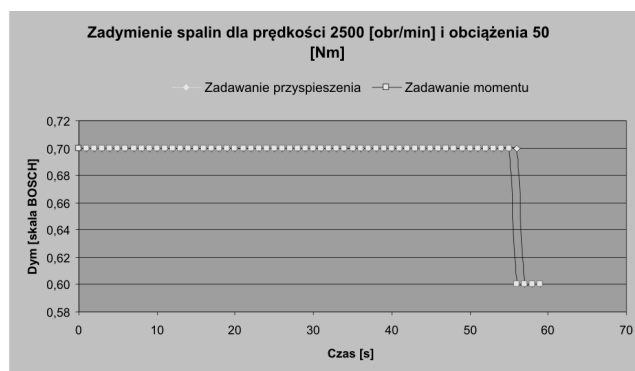
Fig. 6. Fuel consumption vs. time for speed 2500 rpm and load 50 Nm

Rysunek 6 przedstawia przebieg zużycia paliwa w funkcji czasu. Daje się zauważyć znaczące zróżnicowane zużycie paliwa w czasie dla procedury zadawania przyspieszenia. Natomiast dla procedury zadawania momentu krzywa zużycia charakteryzuje się większą stabilnością. Taki wynik bardzo korzystnie przemawia w tym przypadku za procedurą stałomomentową i zaprzecza całkowicie przyjmowanym przed badaniami założeniom.

Przebieg zadymienia spalin w funkcji czasu przedstawiony jest na rysunku 7. Uzyskane wyniki wykazują brak wpływu stosowanych procedur zadawania obciążenia silnika na ten parametr. Widoczna zmiana na wykresie o 0,1 odpowiada dokładności pomiarowej urządzenia do badania zadymienia spalin.

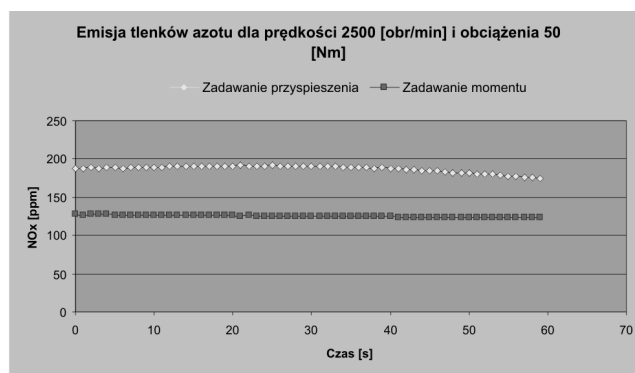
Na rysunku 8 przedstawiono zmianę zawartości tlenków azotu w spalinach w funkcji czasu. Obydwie krzywe mają bardzo stabilny przebieg, z uwidaczniającą się pod koniec przedziału czasowe-

go skłonnością do opadania krzywej emisji dla procedury zadawania przyspieszenia. Rozbieżność zawartości tlenków azotu, jaką można zauważyć dla obu procedur, waha się w granicach 50 ppm.



Rys. 7. Przebieg zadymienia spalin w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 50 Nm

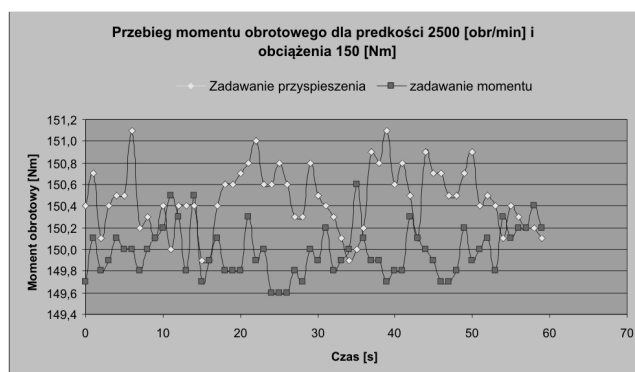
Fig. 7. Smoke vs. time for speed 2500 rpm and load 50 Nm



Rys. 8. Przebieg zawartości tlenków azotu w spalinach w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 50 Nm

Fig. 8. Nitrogen Oxides vs. time for speed 2500 rpm and load 50 Nm

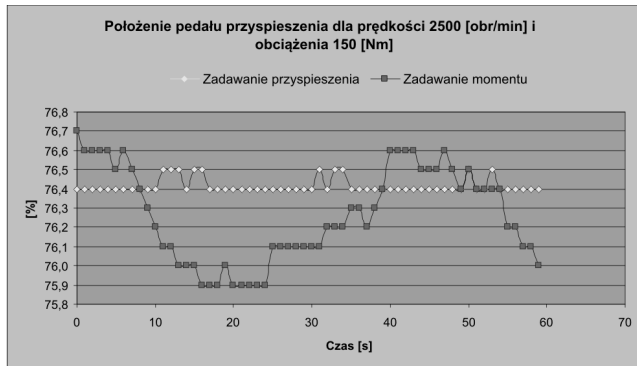
Na rysunkach 9÷13 przedstawiono wykresy porównawcze wielkości mierzonych dla badanych procedur zadawania obciążenia silnika dla prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążenia 50 Nm.



Rys. 9. Przebieg momentu obrotowego w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 150 Nm

Fig. 9. Torque vs. time for speed 2500 rpm and load 150 Nm

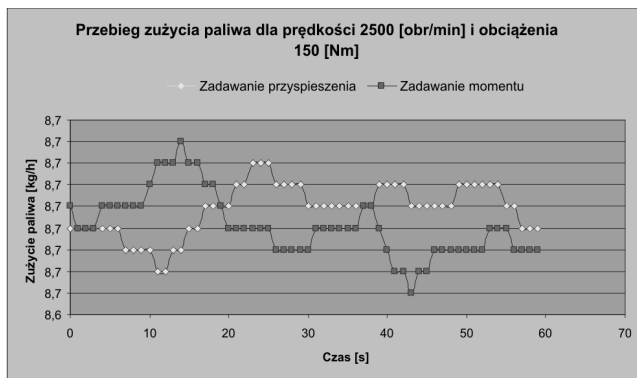
Na rysunku 9 przedstawiono przebieg momentu obrotowego w funkcji czasu. Dokonując porównania dwóch krzywych można stwierdzić, iż obie posiadają podobny charakter przebiegu. Jednak przebieg odpowiadający procedurze zadawania przyspieszenia cechuje się większą niestabilnością w porównaniu do przebiegu oznaczonego na wykresie znacznikiem kwadratowym, który oscyluje w granicach zadanego obciążenia.



Rys. 10. Położenie wirtualnego pedału przyspieszenia w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 150 Nm

Fig. 10. Position of the accelerator vs. time for speed 2500 rpm and load 150 Nm

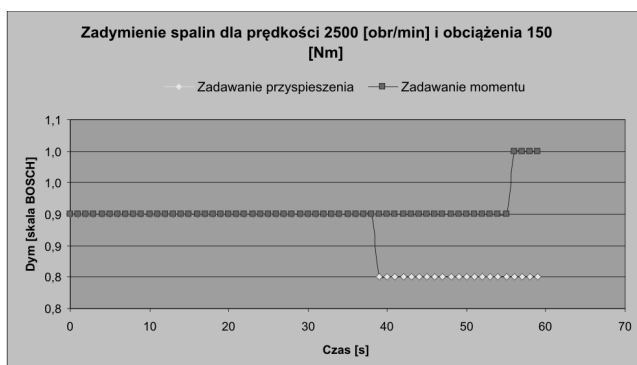
Na rysunku 10 przedstawiono przebieg położenia wirtualnego pedału przyspieszenia. Podobnie jak miało to miejsce dla obciążenia 50 Nm przebieg dla procedury zadawania przyspieszenia jest praktycznie na stałym poziomie, z kolei dla strategii stałomomentowej wykazuje oscylacje wokół 76,4 % wartości maksymalnej.



Rys. 11. Przebieg zużycia paliwa w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 150 Nm

Fig. 11. Fuel consumption vs. time for speed 2500 rpm and load 150 Nm

Przebieg zużycia paliwa w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 11. Obydwa przebiegi cechują się dużą zmiennością w czasie. W tym przypadku nie można wykazać wyraźnej przewagi którejkolwiek ze stosowanych procedur zadawania obciążenia silnika na zużycie paliwa. Wartość oscylacji zużycia paliwa mieści się w zakresie 0,1 kg/h co świadczy o stabilnej regulacji silnika w zakresie dużych obciążeniach.

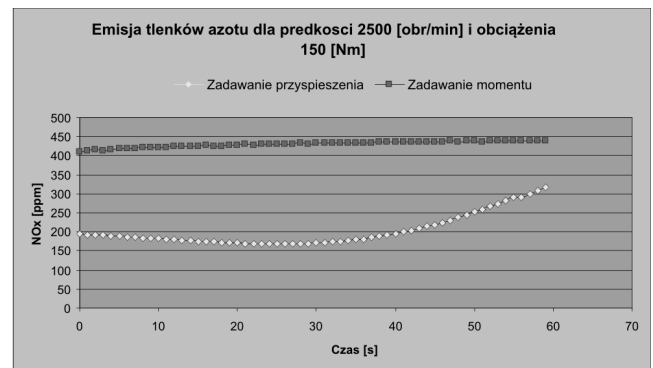


Rys. 12. Przebieg zadymienia spalin w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 150 Nm

Fig. 12. Smoke vs. time for speed 2500 rpm and load 150 Nm

Przebieg zadymienia spalin w funkcji czasu (rys. 12), podobnie jak miało to miejsce dla obciążenia 50 Nm, jest nieczuły na sto-

sowaną procedurę zadawania obciążenia. Jak już wspomniano przy analizie rysunku 7 zmiana o 0,1 wynika z niedokładności pomiarowej urzędzenia.



Rys. 13. Przebieg zawartości tlenków azotu w spalinach w funkcji czasu przy prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążeniu 150 Nm

Fig. 13. Nitrogen Oxides vs. time for speed 2500 rpm and load 150 Nm

Przebiegi zawartości tlenków azotu w spalinach dla obciążenia wynoszącego 150 Nm przedstawione na rysunku 13 cechują się, podobnie jak miało to miejsce dla obciążenia 50 Nm, dużą stabilnością. Jednakże w tym przypadku blisko dwukrotnie większy poziom występuje dla procedury stałomomentowej w stosunku do procedury zadawania przyspieszenia. Dopiero pod koniec próby widać zbieżność obydwu przebiegów.

4. Wnioski

Na podstawie analizy literatury i po przeprowadzeniu badań wnioskować można, że stacjonarne badania stanowiskowe są podstawowym źródłem informacji o zjawiskach i procesach zachodzących wewnątrz silnika spalinowego. Dąży się do tego, aby stanowisko symulowało rzeczywiste warunki, w jakich uczestniczy silnik spalinowy, z tego względu następuje szybki rozwój metod badawczych. Pojawiają się nowoczesne hamownie dynamiczne, w pełni odwzorowujące wszystkie stany jego pracy. Jednak statyczne testy, mimo że nie odzwierciedlają rzeczywistych w typowym użytkowaniu dynamicznych warunków pracy, stanowią źródło wartościowej wiedzy. Oczywiście wiedza ta nie może zastąpić informacji uzyskanych w warunkach dynamicznych, ale dzięki symulacji warunków pracy w dziedzinach obciążenia i prędkości obrotowej można przy użyciu stosunkowo prostych środków przeprowadzać badania o charakterze porównawczym. Z tych powodów mimo znacznego rozwoju metod badań silników spalinowych w warunkach dynamicznych należy w dalszym ciągu upatrywać celowości prowadzenia prac nad statycznymi testami badawczymi.

Na podstawie otrzymanych danych możliwe było sporządzenie wykresów porównawczych, z których jednoznacznie można wnioskować minimalny wpływ analizowanych procedur zadawania momentu na hamowni silnikowej na wskaźniki pracy silnika zawartość składników spalin i zadymienia. Można stwierdzić, że metodę, stałomomentową należy stosować do standardowych badań obciążeniowych, natomiast z metody zadawania przyspieszenia należy korzystać podczas badań optymalizacji wtrysku paliwa.

5. Literatura

- [1] Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005.
- [2] Materiały własne Ośrodka Badawczo-Rozwojowego SM "BOSMAL".
- [3] Badania silników spalinowych, laboratorium. Pod red. W. Serdeckiego, Wyd. Pol. Poznańskiej, wyd.2, Poznań 2001.