

Marcin SIDZINA¹

Opiekun naukowy: Tomasz KNEFEL²

METODYKA OCENY PARAMETRÓW SILNIKA O ZAPŁONIE ISKROWYM PODCZAS TESTÓW PRODUKCYJNYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodykę badawczą, umożliwiającą przeprowadzenie szybkiej analizy porównawczej głównych parametrów silników spalinowych, w warunkach seryjnej produkcji. Wykorzystano standardowe wyniki pomiarów Hot Test, wynikające z procedur stosowanych w nowoczesnym zakładzie produkcyjnym spełniającym najwyższe standardy jakości. Zaproponowana metodyka pozwala z większą dokładnością określić zmiany parametrów osiągniętych przez wyprodukowane jednostki napędowe.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, badania silników, zapłon iskrowy, parametry silnika spalinowego, produkcja silników spalinowych

METHODOLOGY OF EVALUATION OF SPARK IGNITION ENGINES DURING MANUFACTURING TESTS

Summary: The article presents a testing methodology, enabling quick comparative analysis of main parameters of combustion engines, performed in conditions of serial production of the engines. In has been implemented standardized results of measurements from Hot Test cabins, resulted from methodologies used in modern manufacturing plant, complying with the highest quality standards. Proposed methodology enables to determine, with the highest accuracy, changes in engine parameters developed by manufactured power units.

Keywords: combustion engines, spark ignition engines, engine tests, combustion engines parameters, production of combustion engines

1. Wstęp

Już na przestrzeni trzech wieków możemy obserwować rozwój konstrukcji silników spalinowych. Początkowe rozwiązania były eksperymentalne i nikt nie przywiązywał wagi do osiągniętych parametrów, istotne było, aby dana jednostka

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: Samochody i Silniki, msidzina@gmail.com

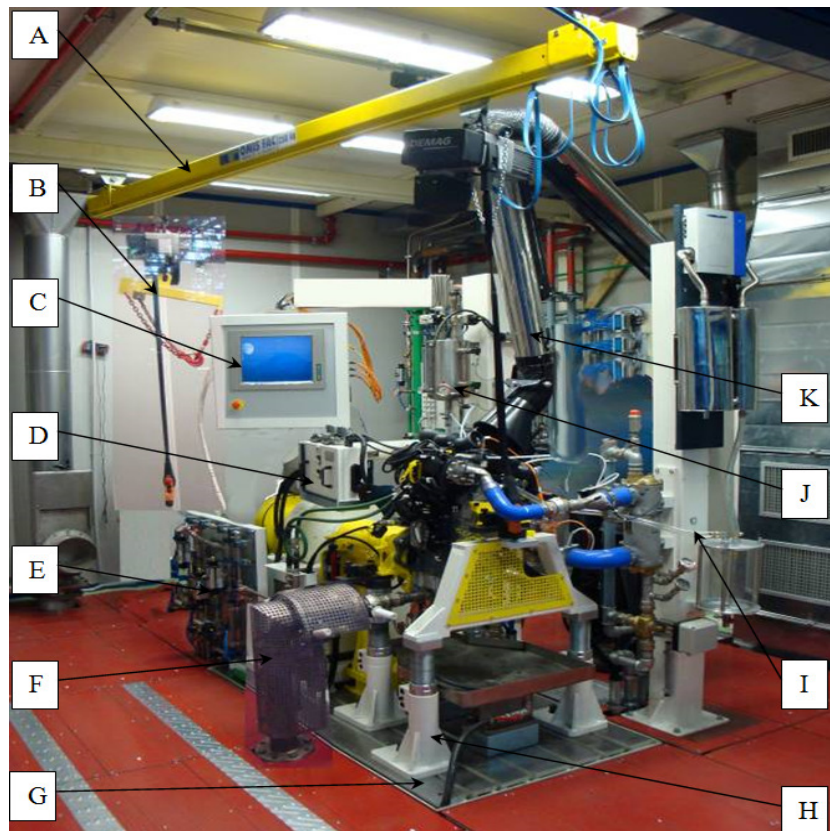
² dr hab. inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, knefel@ath.bielsko.pl

spełniała funkcje użyteczne. Dynamiczny rozwój motoryzacji w XX wieku wymusił na konstruktorach optymalizację pracy jednostki napędowej i poprawę parametrów użytkowych. Wraz z ciągle rosnącym zapotrzebowaniem na silniki trakcyjne zwiększała się konkurencja w branży je produkującej. Konkurencja producentów samochodów zaowocowała dalszym zwiększaniem osiągnięć produkowanych silników przy jednoczesnym zoptymalizowaniu ich parametrów i ograniczaniu kosztów ich produkcji i eksploatacji. Kolejnym etapem wymuszającym rozwój silników był schyłek XX w. gdy zwiększyła się świadomość ekologiczna ludzkości mająca wpływ na dalszy rozwój motoryzacji. Stale rosnące wymagania względem emisji toksycznych składników spalin stawiają przed konstruktorami wyzwania dotyczące dalszej optymalizacji procesów zachodzących w silniku przy jednoczesnym uwzględnianiu ograniczeń wynikających z coraz bardziej rygorystycznych norm emisji toksycznych składników do atmosfery. Istotną rolę w rozwoju silników spalinowych stanowią ich badania doświadczalne. Pozwalają one odtworzyć i zweryfikować w warunkach rzeczywistych obliczenia przeprowadzone w procesie projektowania silnika. Dzięki badaniom do produkcji seryjnej i wielkoseryjnej trafiają tylko konstrukcje pozwalające na spełnienie stawianych im wymagań, a także stanowiące konkurencyjną ofertę dla jednostek już produkowanych.

Badania silników spalinowych w obszarze ich produkcji znacząco różnią się od badań przeprowadzanych w centrach rozwojowych i instytutach badawczych przeprowadzających badania jednostek prototypowych i badania rozwojowe. Przede wszystkim badania doświadczalne są związane z długotrwałymi badaniami jednego silnika, dlatego czas jego instalacji na stanowisku i przygotowanie go do próby badawczej nie odgrywa istotnej roli. Przygotowanie takiego silnika do próby pozwala na instalację tylko niezbędnej aparatury pomiarowej potrzebnej do przeprowadzenia testu danego rodzaju. Badania doświadczalne wiążą się także z przeróbką niektórych elementów w celu instalacji aparatury pomiarowej, co w przypadku badań kontrolnych silników opuszczających linię montażu jest to niemożliwe. Stanowiska kontrolno-pomiarowe na obszarze produkcji muszą cechować się uniwersalnością zastosowanych rozwiązań, a także prostotą instalacji i dostępu do niej. Ponadto przy produkcji sięgającej kilkuset sztuk silników na zmianę niezwykle istotne jest także zachowanie ciągłości pracy stanowiska kontrolno-pomiarowego, aby umożliwić weryfikację założonej w planie liczby silników. W związku z tym znaczna część czynności obsługowych mających na celu przygotowanie silnika do próby musi odbywać się poza kabiną pomiarową. Pozwala to na przygotowywanie silnika do próby w czasie, kiedy wcześniejszy silnik przechodzi próbę pomiarową. Rozwój technologii umożliwił przeprowadzenie instalacji na stanowisku badawczym w znacznej mierze w cyklu automatycznym. W wyniku, czego czynności wykonywane przez operatora są ograniczone do minimum, co pozwala zaoszczędzić czas niezbędny do przeprowadzenia próby pomiarowej silnika. Niniejsza praca została poświęcona analizie rozwiązań zastosowanych w obszarze linii montażowej silników spalinowych nowoczesnego zakładu produkcyjnego mających na celu przygotowanie zmontowanego silnika do próby pomiarowej i jej przeprowadzenie. Analizie poddano wyniki zbierane i archiwizowane podczas takiej próby, a także opracowano sposób ich graficznego przedstawienia ułatwiający ich interpretację.

2. Stanowisko badawcze

Kabiny do przeprowadzania testów ciepłych muszą zagwarantować odpowiednią dźwiękochłonność, a także zagwarantować odpowiedni przepływ powietrza i wyciąg spalin [1]. Ze względu na specyficzne warunki konieczne do przeprowadzenia testów kabiny pomiarowe zostały usytuowane względem linii produkcyjnej tak, aby była możliwość łatwego dostarczenia silników do prób z obszaru testów zimnych, a także łatwego przygotowania do spedycji już zweryfikowanych silników. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny widok stanowiska do przeprowadzania prób na ciepło wraz z wyszczególnionymi podstawowymi elementami.



Rysunek 1. Widok stanowiska badawczego testów ciepłych od przodu: A –wyciągnik, B –urządzenie do podnoszenia silnika, C –panel operatora, D –skrzynka centralki, E –panel benzyny na stanowisku, F –wyciąg spalin, G –podstawa montażowa, H –wsporniki nastawne, I –urządzenie do pomiaru przedmuchów spalin oraz intercooler, J –zespół zasilająco-kontrolny układu chłodzenia silnika, K –ramię przegubowe nadmuchu powietrza na silnik

Stanowisko badawcze silnika musi być wyposażone w czujniki umożliwiające zbieranie informacji na temat poszczególnych parametrów pracy silnika. Czujniki zainstalowane na stanowisku to czujniki laboratoryjne, które cechują się znacznie większą dokładnością pomiarową niż czujniki stosowane w samochodzie pozwalające

kontrolować pracę silnika. W tabeli 1 przedstawiono główne parametry mierzone podczas prób przez czujniki pomiarowe wraz z ich zakresem pomiarowym i dokładnością pomiaru.

Tabela 1. Wykaz głównych czujników stosowanych podczas testów silnika [2],[3]

Mierzony parametr	Jednostka	Zakres pomiarowy	Dokładność
Moment obrotowy	Nm	150	0,1 Nm
Prędkość obrotowa	obr/min	0 ÷ 8000	1 obr/min
Przedmucha spalin	l/min	0 ÷ 50	0,1 l/min
Ciśnienie powietrza	MPa	0 ÷ 1	0,02 MPa
Ciśnienie oleju	bar	0 ÷ 10	0,01 bar
Ciśnienie za turbosprężarką	bar	0 ÷ 2,5	0,01 bar
Ciśnienie spalin	bar	0 ÷ 0,5	0,01 bar
Temperatura oleju	°C	0 ÷ 120	±0,3 °C
Temperatura wody dopływającej	°C	0 ÷ 120	±0,3 °C
Temperatura wody wypływającej	°C	0 ÷ 120	±0,3 °C
Temperatura spalin	°C	0 ÷ 1000	±1,5 °C
Ciśnienie atmosferyczne	mbar	800 ÷ 1200	1 mbar
Temperatura otoczenia	°C	-30 ÷ 70	0,1 °C
Wilgotność	%	0 ÷ 100	0,1 %

3. Obiekt badań i metodyka pomiarów

W odróżnieniu od badań eksperymentalnych silników badania w cyklu produkcyjnym muszą cechować się uniwersalnością aparatury pomiarowej i prostotą montażu silnika na stanowisku pomiarowym. Istotnym jest, aby każde stanowisko pracowało z możliwie najkrótszymi przerwami. W związku z tym znaczna część procesu przygotowania silnika do instalacji na stanowisku musi odbywać się poza kabiną pomiarową, aby umożliwić jej jak najdłuższą pracę, a co za tym idzie możliwie największą ilość przebadanych silników. Każdy silnik poddawany jest próbie testów ciepłych przechodzi go według określonego cyklu. W zależności od zapotrzebowania, silnik może zostać poddany próbie: 15 minutowej, 22 minutowej, 30 minutowej, 1 godzinnej, 4 godzinnej, 8 godzinnej lub 22 godzinnej. Każda próba rozpoczyna się tak samo – następuje rozgrzewanie silnika aż do osiągnięcia odpowiedniej temperatury oleju (65°C). Następnym etapem jest docieranie, które dzieli się na kroki zmieniające się wraz ze wzrastającym obciążeniem i prędkością obrotową. Ostatnim etapem podstawowej próby pomiarowej jest zadawanie takich parametrów pracy, które mają na celu osiągnięcie przez silnik maksymalnych parametrów.

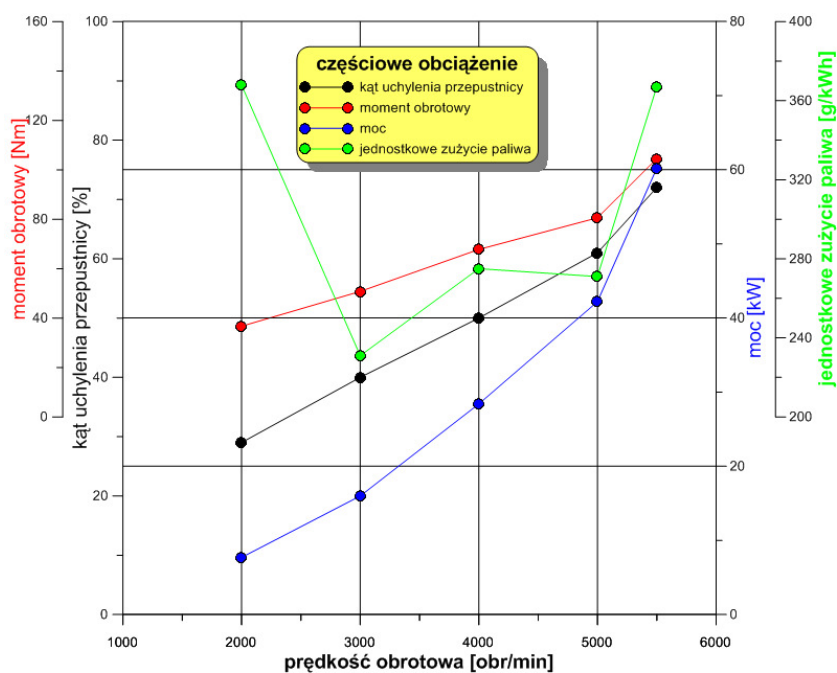
Obiektem badań była rodzina nowoczesnych silników spalinowych o pojemności 0,9l. Ze względu na zapotrzebowanie rynku silniki są produkowane w kilku wersjach różniących się osiąganymi parametrami, a także sposobem zasilania. Analizie zostały poddane grupy silników wersji 85 KM, 105 KM, a także wersji 80 KM zasilanej dwupaliwowo (benzyna/CNG).

4. Wyniki pomiarów i ich analiza

Podczas pomiarów zostały zebrane wyniki dla 10 silników każdej z badanej wersji. Wyniki zebrano w formie tabelarycznej, a następnie na ich podstawie wykreślono przebiegi wybranych wartości.

4.1. Obciążenia częściowe - parametry główne

Pierwszą rodziną charakterystyk są przebiegi wyznaczone dla obciążeń częściowych. Na wykresach (rys. 2) zestawiono moment obrotowy, moc, jednostkowe zużycie paliwa i kąt otwarcia przepustnicy w funkcji prędkości obrotowej badanego silnika.



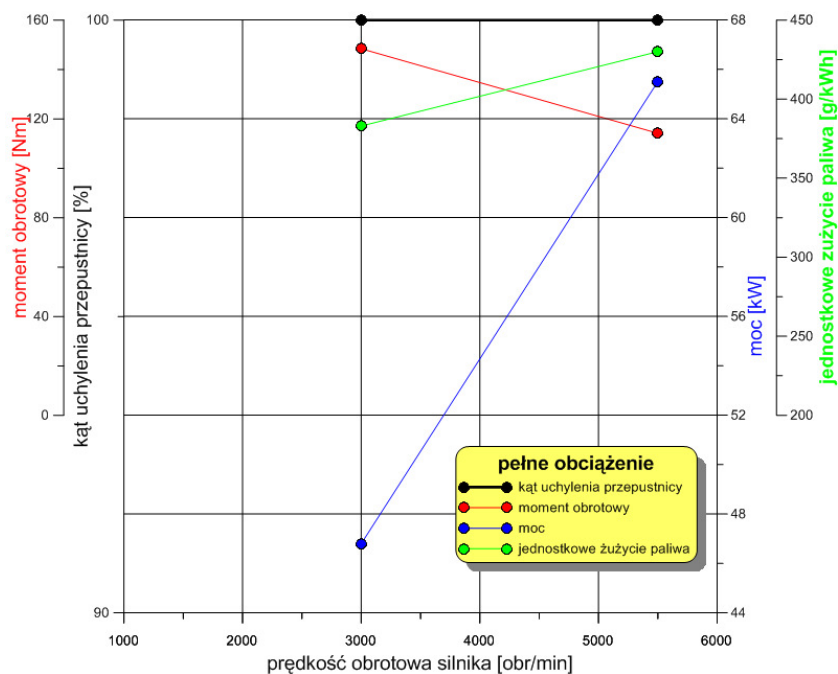
Rysunek 2. Charakterystyki dla obciążeń częściowych

Należy podkreślić, że kąt otwarcia przepustnicy nie odwzorowuje wartości, jakie przyjmuje ona dla silnika zamontowanego w samochodzie. Dzieje się tak z dwóch powodów: przepustnica zamontowana na stanowisku pomiarowym umożliwia większy zakres regulacji niż wynika to z zapotrzebowania silnika. Ponadto w silniku wyposażonym w system multiair nie odgrywa ona tak istotnej roli jak w klasycznym silniku o zapłonie iskrowym, ze względu na sterowanie napełnieniem silnika przez

zawory dolotowe. Przedstawienie na wykresie jej wartości ma na celu zobrazowanie zwiększania obciążenia silnika wraz z wzrostem prędkości obrotowej.

4.2. Pełne obciążenie parametry główne

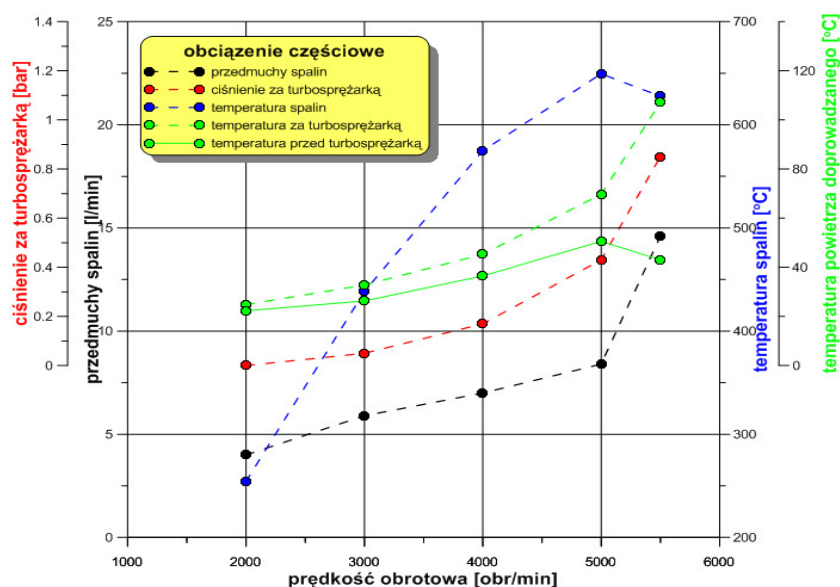
Kolejna rodzina otrzymanych charakterystyk (rys. 3) jest oparta o pomiary tych samych parametrów, co poprzednio (rozdział 4.1) jednak dla punktów pomiarowych, przy których silnik osiąga maksymalny moment i maksymalną moc. Kąt uchylenia przepustnicy dla pełnych obciążeń jest w całym zakresie pomiaru równy 100 %. Moment obrotowy osiąga swoją maksymalną wartość przy 3000 obr/min. Maksymalna wartość mocy jest osiągana przy prędkości 5500 obr/min. Jednostkowe zużycie paliwa osiąga mniejszą wartość w punkcie pomiarowym maksymalnego momentu niż przy pełnej mocy.



Rysunek 3. Charakterystyki dla pełnego obciążenia

4.3. Parametry dodatkowe –częściowe obciążenia

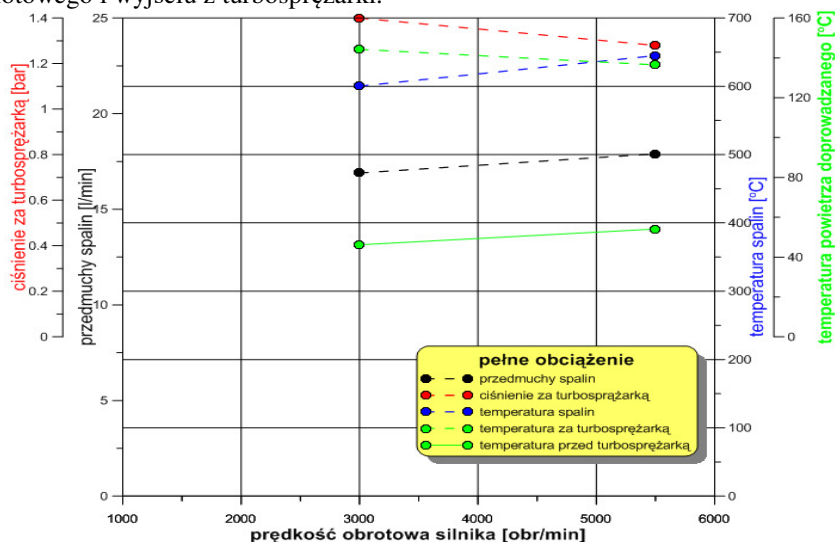
Następną grupą są charakterystyki dodatkowych parametrów rejestrowanych podczas próby dla obciążeń częściowych (rys. 4). Na wykresach pokazano przedmuchy spalin, ciśnienie za turbosprężarką, temperaturę spalin mierzoną za katalizatorem, a także temperaturę powietrza zasilającego silnik mierzoną na wejściu do kolektora dolotowego i wyjściu z turbosprężarki w funkcji prędkości obrotowej.



Rysunek 4. Charakterystyki obciążeń częściowych

4.4. Parametry dodatkowe –pełne obciążenie

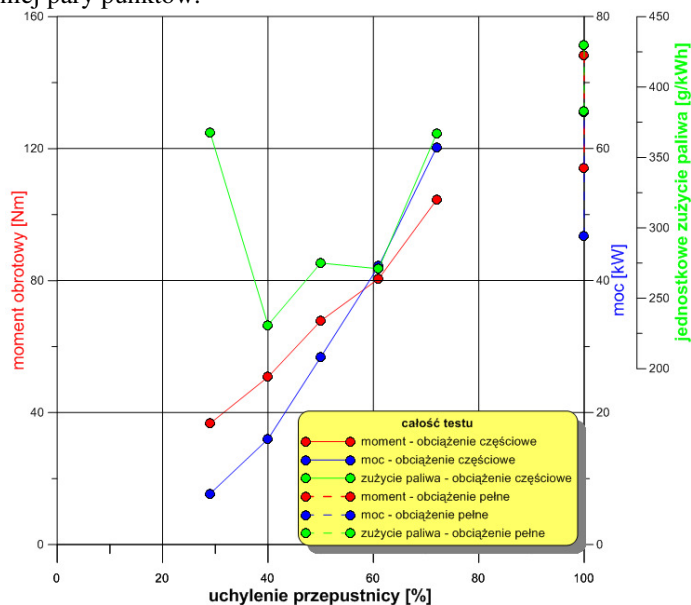
Kolejną grupą są charakterystyki oparte o pomiary dodatkowych parametrów dla maksymalnych wartości momentu i mocy (rys. 5). Obrazują one, podobnie jak dla obciążeń częściowych, przedmuchy spalin, ciśnienie za turbosprężarką, temperaturę spalin oraz temperaturę powietrza zasilającego silnik na wejściu do kolektora dolotowego i wyjściu z turbosprężarki.



Rysunek 5. Charakterystyki dla obciążeń pełnych

4.5. Parametry główne w funkcji kąta uchylenia przepustnicy

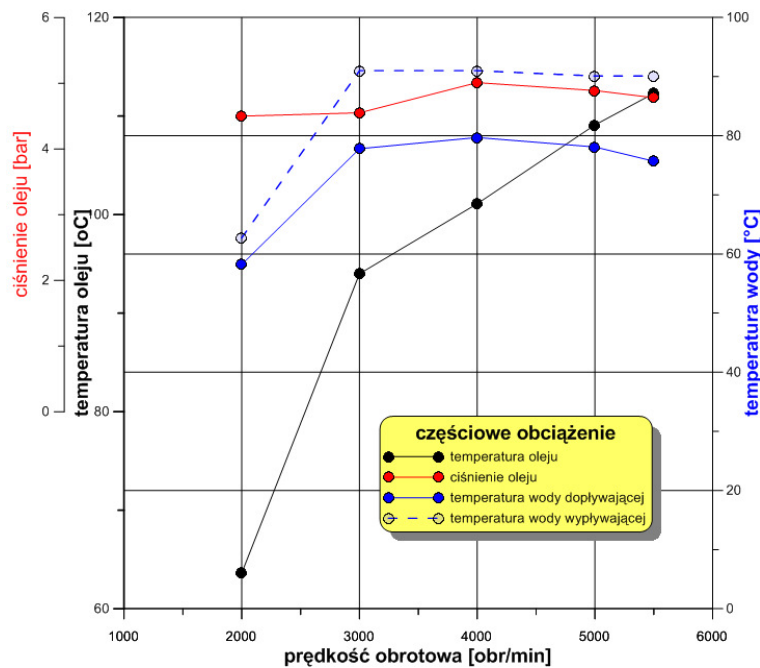
Kolejne charakterystyki przedstawiają parametry główne (moment, moc i jednostkowe zużycie paliwa) dla obciążeń częściowych i pełnych, w funkcji kąta uchylenia przepustnicy (rys. 6). Pewnego wyjaśnienia wymaga interpretacja wartości przedstawionych na prawej osi pionowej. Są to wartości zmierzone przy w pełni otwartej przepustnicy, a więc ich ocena polega na analizie wzajemnego położenia odpowiedniej pary punktów.



Rysunek 6. Charakterystyki w funkcji kąta uchylenia przepustnicy

4.6. Parametry dodatkowe –obciążenia częściowe

Ostatnia rodzina charakterystyk przedstawia parametry dodatkowe dla obciążeń częściowych. Przedstawione charakterystyki obrazują temperaturę cieczy chłodzącej na wejściu i wyjściu z silnika, a także temperaturę i ciśnienie oleju w funkcji prędkości obrotowej (rys. 7).



Rysunek 7. Charakterystyki obciążenia częściowych

3. Podsumowanie i wnioski

Badania stanowiskowe silników spalinowych odgrywają niezwykle istotną rolę w procesie konstruowania i produkowania silników. Próby doświadczalne silnika pozwalają zweryfikować wszystkie parametry założone na etapie projektowania. Badania eksperymentalne pozwalają określić wytrzymałość użytych komponentów i wprowadzić istotne zmiany poprawiające trwałość silnika przed wprowadzeniem go do produkcji. W dalszej kolejności eksperymenty przeprowadzane na etapie przedprodukcyjnym pozwalają zabezpieczyć producenta przed różnorodnymi problemami jakościowymi powstałymi w czasie eksploatacji.

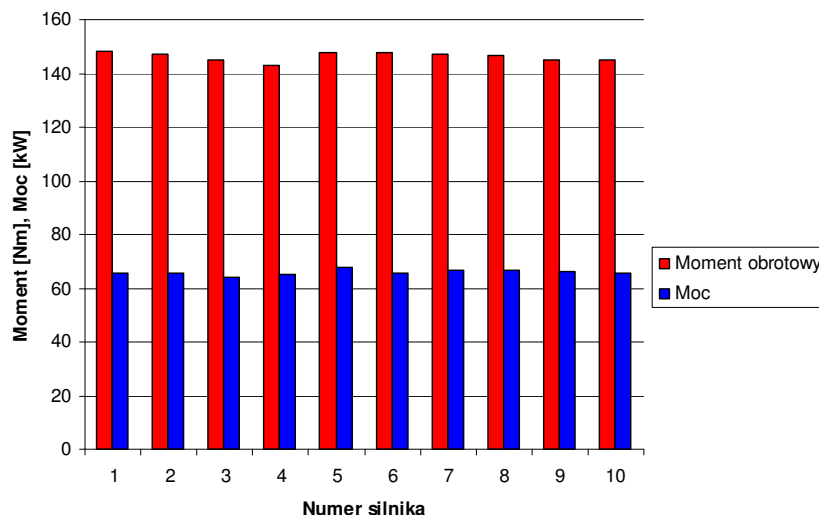
Testy realizowane na etapie produkcyjnym pozwalają na weryfikację parametrów osiągniętych przez silnik zakładanych przez konstruktorów. Istotą badań prowadzonych bezpośrednio po zmontowaniu jednostki jest także możliwość weryfikacji parametrów, których wartości wzbudziły wątpliwości na wcześniejszych etapach kontroli produkcji. Ponadto podczas próby rejestrowane są także parametry mniej istotne z punktu widzenia osiągnięć silnika, ale istotne z punktu widzenia weryfikacji stabilności procesów zachodzących w silniku.

Specyficzną cechą badań realizowanych w obszarze produkcji jest konieczność maksymalnego zintensyfikowania prowadzonych pomiarów w celu umożliwienia przeprowadzenia testów jak największej grupy silników. Z tego względu większość pomiarów przeprowadza się w stanach nieustalonych, co w pewnym stopniu może wpływać na otrzymane wyniki. Pierwszy etap próby na hamowni (obciążenia częściowe) jest zarazem docieraniem nowo wyprodukowanego silnika. Duży wpływ

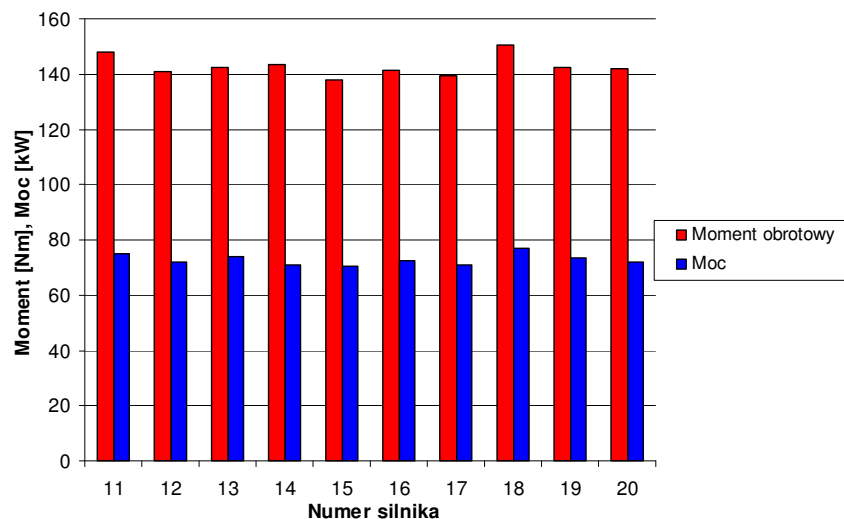
na parametry rejestrowane na tym etapie pomiarów ma nagrzewanie się silnika do parametrów znamionowych. Największą bezwładnością cechuje się tutaj pomiar temperatury spalin. Sonda pomiarowa mierząca jej wartość jest bowiem umiejscowiona za katalizatorem na połączeniu z układem wydechowym co powoduje jeszcze bardziej wydłużenie się interwału czasowego potrzebnego do osiągnięcia warunków znamionowych. Z tego względu zmierzone wartości mogą różnić się znacząco od wartości zarejestrowanych w badaniach doświadczalnych dla pracy silnika w warunkach znamionowych. Drugi etap próby (obciążenia pełne) odbywa się już przy nagrzanym silniku, a więc w warunkach znamionowych. Parametry zmierzone w tej części testu produkcyjnego odpowiadają parametrom zarejestrowanym dla warunków ustalonych stąd dostarczają najlepszych danych do analizy porównawczej.

Opracowana metodyka badawcza, umożliwia przeprowadzenie szybkiej analizy porównawczej głównych parametrów silników spalinowych, w warunkach seryjnej produkcji. Wykorzystano standardowe wyniki pomiarów Hot Test, wynikające z procedur stosowanych w nowoczesnym zakładzie produkcyjnym, spełniającym najwyższe standardy jakości. Zaproponowana metodyka pozwala z większą dokładnością określić zmiany parametrów osiąganych przez wyprodukowane jednostki napędowe.

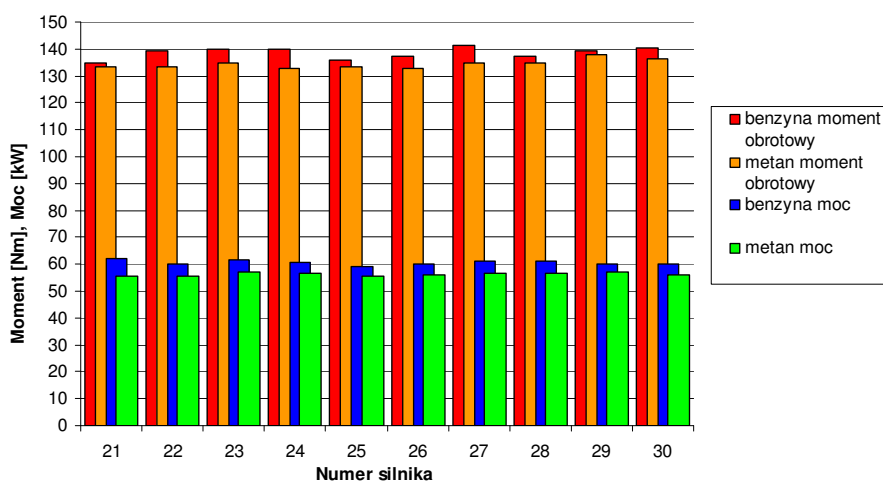
Pomiary zebrane na podstawie cykli testowych dostarczają dużo ciekawych informacji o parametrach osiąganych przez badany silnik. Na podstawie zebranych wyników można zauważyć, iż produkowane obecnie silniki cechują się bardzo dużą powtarzalnością osiąganych parametrów. Wpływ na to ma rozwój technologii produkcyjnych, który sprawił, że komponenty stosowane przy produkcji nowoczesnych silników mogą być wykonane z dużą dokładnością bez drastycznego zwiększania kosztów ich produkcji. Na rysunkach 8, 9 i 10, przedstawiono porównanie parametrów maksymalnych (moment obrotowy i moc) dla grupy 10 silników każdej wersji, dla których zebrano dane pomiarowe.



Rysunek 8. Porównanie osiąganych parametrów maksymalnych dla grupy 10 silników wersji 85 KM



Rysunek 9. Porównanie osiągniętych parametrów maksymalnych dla grupy 10 silników wersji 105 KM



Rysunek 10. Porównanie osiągniętych parametrów maksymalnych dla grupy 10 silników wersji dwupaliwowej (80 KM)

Charakterystyki wykreślone w funkcji stopnia otwarcia przepustnicy mają na celu zobrazować zmiany zarejestrowanych parametrów na etapie całego testu hamowni silnikowej. Pozwalają one zestawić ze sobą wielkości parametrów otrzymanych podczas próby z częściowymi obciążeniami z wartościami zarejestrowanymi dla pełnych obciążeń. Pewną niedogodnością jest w tym przypadku określenie punktów pomiarowych, w których zarejestrowano wartości parametrów dla pełnych obciążeń. Dla ich określenia pomocne mogą być charakterystyki sporządzone dla pełnych obciążeń w funkcji prędkości obrotowej.

Ciekawych informacji porównawczych mogą dostarczyć testy silnika zasilanego dwupaliwowo. Ze względu na możliwość pracy przy zasilaniu dwoma rodzajami paliw (benzyną i metanem) podczas testu produkcyjnego konieczna jest weryfikacja parametrów osiąganych przy obu systemach zasilania. Dla punktu pomiarowego maksymalnego momentu sprawność ogólna dla uśrednionej wartości grupy 10 silników jest większa przy zasilaniu CNG. Poniekąd wynika to z dużego wysilenia silnika i możliwości wystąpienia spalania detonacyjnego. W celu ograniczenia możliwości wystąpienia detonacji w zakresie dużych obciążeń i niskich prędkości obrotowych reguluje się dawkę paliwa. W przypadku zasilania benzyną zwiększa się dawkę paliwa i silnik pracuje na mieszance bogatej. Większa dawka paliwa powoduje lepsze odbieranie ciepła z głowicy (odparowanie), a co za tym idzie zmniejszenie temperatury pracy. Dla zasilania gazem efekt odparowania (poboru energii) nie występuje w związku, z czym w celu ograniczenia temperatury zmniejsza się ilość gazu podawanego na cykl roboczy (silnik pracuje na mieszance ubogiej).

LITERATURA

1. SERDECKI W., RYMANIAK Ł., PIELECHA I., KRZYMIEN' A., WISŁOCKI K., KRZYMIEN' P.: Badania silników spalinowych i ich układów funkcjonalnych /pod redakcją Wojciecha Serdeckiego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2017.
2. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa hamulca dynamometrycznego na prądy wirowe: Manuale serie FR Rev. 11
3. Świadectwo wzorcowania nr 20609/4/2015