

Badania mocy silnika pojazdu z wykorzystaniem metod inercyjnych

Andrzej Kuranc

W pracy zestawiono i krótko scharakteryzowano wybrane metody badań pojazdów prowadzące do oceny mocy jednostek napędowych. Główną uwagę skupiono na metodach powszechnie dostępnych, a więc opartych o tańszy, ale często również mniej precyzyjny sprzęt, które opierają się na analizie procesu rozpędzania pojazdu. Przedstawiono także przykładowe wyniki badań realizowanych w warunkach drogowych i otrzymane na ich podstawie charakterystyki.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, moc, hamownia, badania pojazdów.

Wstęp

Bardzo dynamiczny rozwój motoryzacji w ostatnich latach nakłada coraz to wyższe wymagania na produkowane pojazdy oraz ich stan techniczny. Ma to bowiem bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i komfort oraz ekonomikę jazdy i zanieczyszczenia motoryzacyjne.

Istnieje zatem zapotrzebowanie na badania pozwalające szybko określić stan techniczny silnika użytego do napędu pojazdu.

Bezdemontażowe metody badań stanu technicznego silników opierają się na założeniu, że podczas pracy silnika spalinowego generowane są dwa rodzaje procesów wyjściowych wykorzystywanych jako sygnały diagnostyczne:

- robocze (użyteczne), bezpośrednio wynikające z użytecznej funkcji silnika, do których zalicza się moc (moment obrotowy) na wale korbowym, prędkość obrotową wału korbowego, zużycie paliwa, ciśnienie sprężania w cylindrach, parametry procesu spalania itp.
- resztkowe (towarzyszące), powstające jako wtórny efekt procesów roboczych w silniku (najczęściej zakłócają te procesy). W silniku spalinowym procesami resztkowymi są procesy wibroakustyczne, procesy termiczne, zużycie oraz skład spalin.

Diagnostyczne badania silników spalinowych opierają się głównie na pomiarach wybranych parametrów pracy w specyficznych warunkach, np. na biegu jałowym, bez obciążenia itp. Dla tych warunków są konstruowane urządzenia i przyrządy diagnostyczne, które mają zastosowanie w metodach dotyczących np. pomiaru ciśnienia sprężania, szczelności cylindrów, prawidłowości pracy aparatury paliwowej itp. Badania diagnostyczne można również przeprowadzać w warunkach drogowych, w zakresie uzależnionym od badanych wielkości i pożądanych informacji. Często są to badania związane z określeniem parametrów dynamicznych pojazdu lub jego uciążliwości dla środowiska. W niniejszym opracowaniu skupiono uwagę na badaniach, które miały na celu wstępną ocenę mocy jednostki napędowej pojazdu.

1. Przegląd wybranych metod oceny mocy

Wśród metod pomiarowych wykorzystywanych do oceny mocy jednostek napędowych pojazdów wyróżnia się zasadniczo dwie metody; tzw. metodę obciążeniową - quasi statyczną oraz metodę inercyjną - dynamiczną.

Metoda obciążeniowa umożliwia bardzo precyzyjny pomiar momentu obrotowego silnika przy stałej prędkości obrotowej, który dokonywany jest poprzez pomiar momentu reakcyjnego na obudowie hamulca. Moc obliczana jest w dalszej kolejności jako iloczyn momentu i szybkości kątowej.

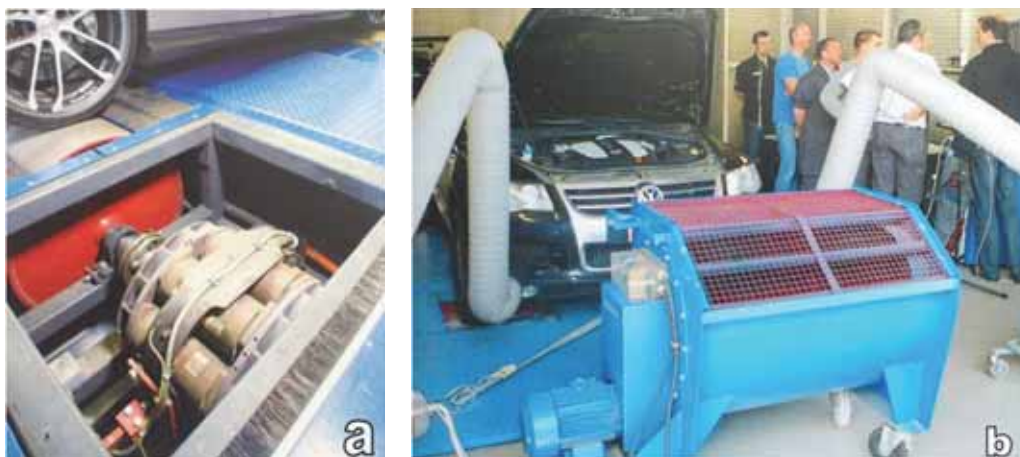
Dla założonej z góry szybkości obrotowej silnika zmieniają się nastawy regulacyjne silnika i dobierane maksymalne obciążenie (hamulcem), przy którym wartość realizowanej prędkości obrotowej jest stabilna. Pomiar trwa kilka sekund a następnie procedura jest powtarzana dla kolejnej wybranej wartości prędkości obrotowej. Charakterystyka składa się z kilkunastu lub kilkudziesięciu punktów pomiarowych w zależności od potrzeb. Pomiar nie musi odbywać się przy maksymalnym otwarciu przepustnicy, co umożliwia np. sporządzanie charakterystyk częściowych.

Metoda ta jest bardzo przydatna przy precyzyjnym regulowaniu silnika ponieważ można właściwie dobrać obciążenie i czas pomiaru w poszczególnych punktach, co jest istotne z punktu widzenia konstrukcji danego silnika. Jednakże charakterystyka jest wykreślana w oparciu o kilka punktów pomiarowych, ponadto w podstawowym pomiarze nie ma możliwości pomiaru strat w układzie napędowym. Bardzo istotne jest również realne zagrożenie przegrzania i przeciążenia badanych silników z uwagi na stosunkowo długi okres pełnego obciążania. Stąd konieczność stosowania intensywnego chłodzenia silnika, co nie jest łatwe w warunkach stanowiskowych i wymaga kosztownych systemów nawiewu [9].

Druga ze wspomnianych metod (inercyjna) oparta jest o pomiary zmian szybkości pojazdu i określenie pracy wykonanej przez siłę napędową oraz siły oporów ruchu.

Stosunkowo dobre wyniki pomiarów szybkości i przyspieszeń uzyskuje się poprzez zastosowanie tzw. piątego koła [5, 7]. Realizacja pomiaru wymaga połączenia pojazdu z dodatkowym urządzeniem np. w postaci koła rowerowego zamontowanego na dociskanym sprężyną do jezdni wysięgniku, które z uwagi na małą masę i mały masowy moment sił bezwładności będzie się toczyło za pojazdem bez poślizgu, umożliwiając precyzyjny pomiar. Z uwagi na znaczny postęp techniki obecnie coraz rzadziej stosuje się to urządzenie, choć nie należy niedoceniać jego możliwości.

Znane są również metody optyczne (CORREVIT/KISTLER) pozwalające bardzo precyzyjnie określać zmiany szybkości pojazdu, ale w porównaniu do piątego koła są one bardziej kosztowne. Znacznie upraszczając można powiedzieć, że układ optyczny głowicy pomiarowej oświetla powierzchnię



Rys. 1. Obciążeniowa hamownia podwoziowa z hamulcem elektrowirowym (a) i systemem nawiewu powietrza (b) na pojazd zapewniającym intensywne chłodzenie silnika [9]

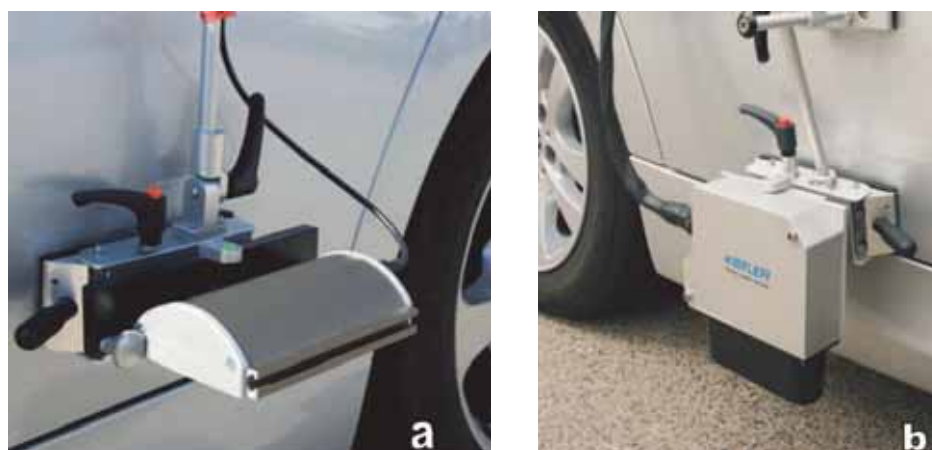
jezdni i rejestruje zmiany natężenia światła od niej odbitego, padającego poprzez raster pryzmatyczny na dwie ustawione w linii fotokomórki, co po dalszej obróbce sygnałów napięciowych pozwala określić prędkość pojazdu [7, 11]. Innymi bezkontaktowymi, ale również kosztownymi metodami są metody radarowe wykorzystujące zjawisko Dopplera [2]

W przypadku poszukiwania dostępnych współcześnie metod możliwe jest wykorzystanie niektórych sygnałów odczytanych z elektronicznego sterownika pojazdu lub innych informacji prowadzących do określenia zmian prędkości i przyspieszeń pojazdu. Przykładem takiego urządzenia może

być odbiornik GPS AX22 zintegrowany z wewnętrznymi czujnikami przyspieszenia umożliwiające pomiary parametrów ruchu pojazdu bez montażu zewnętrznych jak głowice pomiarowe wspomnianych wyżej urządzeń [10].

Jeszcze inne metody mogą wykorzystywać informacje o prędkości pojazdu dostępne poprzez interfejs komunikacyjny sterownika pojazdu, czy konkretnego systemu takiego jak ABS lub ESP.

W każdej ze wspomnianych metod drogowych istotą wykonanych badań jest wyznaczenie zmian szybkości pojazdu, co prowadzi do określenia zmian jego energii kinetycznej (przy



Rys. 2. CORREVIT Dwuosiowe czujniki do pomiarów dynamiki ruchu pojazdu: a – krótkofalowy zastosowania poza drogowe, b – optyczny do badań na szosie [11]



Rys. 3. Elementy urządzenia pomiarowego AX22 firmy Race-Technology
Źródło: Opracowanie własne.

założeniu, że energia potencjalna nie ulega zmianie) będących wynikiem dostarczonej lub wyprowadzonej z układu mocy mechanicznej. Metodę tą można określić jako inercyjną i można ją realizować zarówno w warunkach drogowych jak również na stanowisku hamowni podwoziowej.

2. Metoda inercyjna

Metoda inercyjna, w odróżnieniu do metody obciążeniowej, gdzie mierzymy moment obrotowy, polega na wyznaczeniu mocy w sposób pośredni. Bezpośrednio mierzonym parametrem jest bowiem częstotliwość impulsów elektrycznych, będących odzwierciedleniem przebytej drogi i realizowanej prędkości. W warunkach drogowych obciążenie silnika stanowi bezwładność masy całego pojazdu i elementów wirujących, opory ruchu pojazdu i opory w układzie napędowym [1,5]. Jeżeli badanie odbywa się na stanowisku hamowni inercyjnej wówczas ruch pojazdu zastąpiony jest ruchem obrotowym rolek stanowiskowych i kół pojazdu. Obciążeniem silnika są wówczas: masowe momenty bezwładności elementów wirujących oraz wewnętrzne opory mechanizmu napędowego i opory toczenia. Dlatego im większe i zarazem cięższe rolki i im niższa wartość przełożenia tym pomiar będzie trwał dłużej, lecz lepsza będzie współpraca kół z podłożem a wyniki będą bardziej dokładne [12].

Pomiar inercyjny bazuje na rozpędzaniu pojazdu od minimalnej do maksymalnej prędkości dla danego przełożenia. Podczas rozpędzania zbierane są dane potrzebne do wyznaczenia mocy wydatkowanej na zmiany energii kinetycznej, jednak nie ma informacji o mocy potrzebnej do pokonania występujących w tym samym czasie oporów ruchu, stąd konieczne są badania podczas wybiegu pozwalające określić zmiany energii kinetycznej powodowane tylko obecnością tych oporów. W związku z tym po rozpędzeniu pojazdu układ napędowy zostaje odłączony (rozłączone sprzęgło) przy załączonym nadal przełożeniu i realizowany jest swobodny wybieg [4, 12].

Można zatem zapisać zależności prowadzące do wyznaczenia mocy i momentu obrotowego silnika. Oczywiście w warunkach pomiaru wyznaczać będziemy uśrednioną moc mechaniczną (1) dla danego przedziału czasowego przy kolejnych odczytach szybkości.

$$\hat{N} = \frac{\Delta E_k}{\Delta t} \quad (1)$$

gdzie:

\hat{N} – uśredniona moc mechaniczna,
 ΔE_k – zmiana energii kinetycznej w czasie Δt .

Podany wzór (1) prowadzi do wyznaczenia zależności matematycznej określającej moc wykorzystaną na rozpędzanie (2) oraz moc oporów ruchu (3), które po zsumowaniu stanowią moc silnika odbieraną na wale korbowym (4).

$$N_{ri} = \frac{m_c \cdot |v_{i+1}^2 - v_i^2|}{2 \cdot |t_{ri+1} - t_{ri}|} \quad (2)$$

$$N_{wi} = \frac{m_c \cdot |v_{i+1}^2 - v_i^2|}{2 \cdot |t_{wi+1} - t_{wi}|} \quad (3)$$

$$N_s = N_R + N_W \quad (4)$$

W związku z powyższym dla danej zmiany prędkości moc silnika obliczymy z zależności (5)

$$N_{si} = \frac{m_c \cdot |v_{i+1}^2 - v_i^2|}{2} \left(\frac{1}{|t_{ri+1} - t_{ri}|} + \frac{1}{|t_{wi+1} - t_{wi}|} \right) \quad (5)$$

gdzie:

m_c – masa całkowita pojazdu z wyposażeniem podczas pomiaru,

v_i – kolejne wartości prędkości rejestrowane odpowiednio dla chwili t_{ri} dla rozpędzania i t_{wi} dla wybiegu.

Do głównych zalet metody inercyjnej w porównaniu do obciążeniowej należą między innymi: krótszy czas pomiaru i tym samym krótszy okres pełnego obciążenia silnika, mniejsze nakłady inwestycyjne w przypadku stanowiska inercyjnego i znacznie niższe w przypadku badań drogowych. Niestety nie ma możliwości wykonania badań przy stałym obciążeniu dla ustalonej wartości prędkości obrotowej silnika, wymagana jest duża precyzja pomiarów prędkości i w przypadku badań drogowych odpowiedni odcinek pomiarowy np. płyta starego lotniska, który umożliwi bezpieczne wykonanie pomiarów oraz zapewni poziomą i płaską nawierzchnię na wymaganym dystansie.

3. Przykłady badań drogowych

Jak już wcześniej wspomniano badania drogowe w zakresie wyznaczania mocy jednostki napędowej metodą inercyjną można realizować kilkoma sposobami w zależności od sposobu pomiaru prędkości.

Przykładem urządzeń umożliwiających takie pomiary jest Dynomet, będący formą „piątego koła”. Jest to bowiem urządzenie montowane na jednym z kół pojazdu, a nie ciągnięte za nim (rys. 4). System ten pozwala na wyznaczenie takich parametrów jak: moc i moment obrotowy silnika, czas przyspieszania w dowolnym przedziale prędkości, droga hamowania, czas przejazdu danego dystansu, prędkość maksymalna, czy niedokładność wskazań prędkościomierza przy różnych prędkościach [12].

Podczas pomiarów do komputera wprowadza się dane pojazdu, takie jak masa całkowita, przełożenie układu napędowego oraz obwód toczny koła. Ponadto w celu odniesienia wyników do fizycznych warunków normalnych wprowadza się informacje o parametrach środowiskowych.

W wyniku przeprowadzonych testów drogowych zarejestrowane dane są przetwarzane w oprogramowaniu kompu-



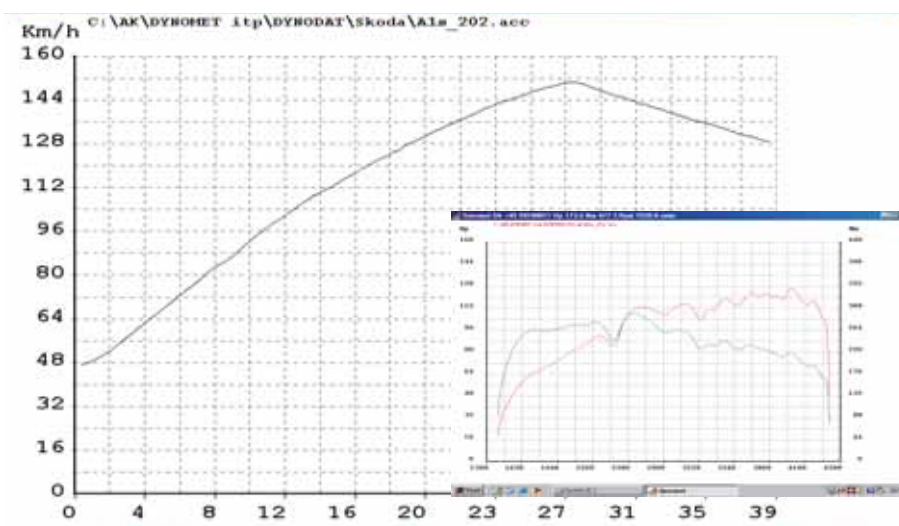
Rys. 4. Montaż czujnika obrotu koła Dynomet na przykładowym pojeździe

Źródło: Opracowanie własne.

Tab. 1. Zestawienie wybranych danych rejestrowanych podczas ruchu pojazdu urządzeniem Dynomet oraz obliczonych na ich podstawie

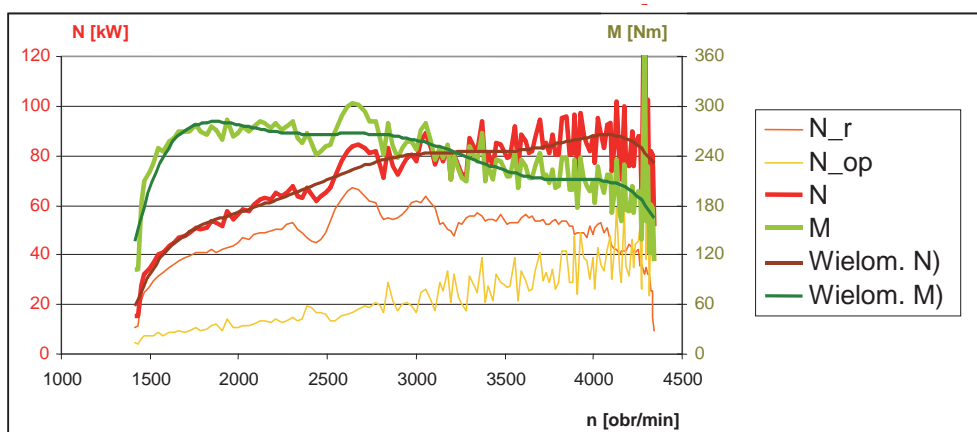
Dane zarejestrowane DYNAMOMET		Wyniki obliczeń						
Czas rozp.	V	n_s	Czas wyb.	Ek	Nk_r	Nk_op	Ns	Mo
[s]	[km/h]	[obr/min]	[s]	[J]	[kW]	[kW]	[kW]	[nm]
...
24,4	144,7	4173,1	30,95	1 315 149	41,508	58,659	100,167	229,23
24,6	145,0	4186,3	30,81	1 323 477	41,639	35,415	77,054	175,78
24,8	145,5	4200,3	30,58	1 332 354	44,386	31,592	75,978	172,75
25,0	146,1	4213,9	30,29	1 340 998	43,222	46,324	89,546	202,94
25,2	146,5	4226,7	30,11	1 349 144	40,730	35,044	75,774	171,21
25,4	147,0	4239,5	29,88	1 357 315	40,853	44,091	84,944	191,35
25,6	147,4	4252,7	29,69	1 365 775	42,300	45,795	88,096	197,83
25,8	147,8	4263,8	29,51	1 372 934	35,793	51,809	87,602	196,21
26,0	148,1	4274,9	29,37	1 380 111	35,887	26,064	61,950	138,39
26,2	148,7	4284,8	29,09	1 386 507	31,978	139,733	171,710	382,71
26,4	148,8	4295,5	29,05	1 393 452	34,726	38,010	72,736	161,71
26,6	149,2	4305,4	28,86	1 399 878	32,132	70,508	102,640	227,67
...

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 5. Wykres rozpędzania i wybiegu oraz otrzymane na tej podstawie charakterystyki silnika uzyskane w oparciu o oprogramowanie Dynomet

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 6. Charakterystyki silnika uzyskane w wyniku obliczeń w oparciu o dane zarejestrowane w programie Dynomet

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 7. Grupa wskaźnik zawierająca informację o szybkości pojazdu (VW Golf IV 1,9 TDI)
 Źródło: Opracowanie własne.

terowym i na ich podstawie generowane są charakterystyki rozpędzania oraz mocy i momentu, które zaprezentowano na rysunku 5. Oprogramowanie umożliwia wgląd w dane zarejestrowane, których fragment przedstawiono w tabeli 1.

Dzięki wyeksportowaniu danych z oprogramowania Dynamet możliwe było wykonanie własnych obliczeń zgodnie z opisaną wzorem 5 zależnością. Wartości prędkości wprowadzono do arkusza kalkulacyjnego i wykonano obliczenia oraz na ich podstawie sporządzono charakterystyki zaprezentowane na rysunku 6.

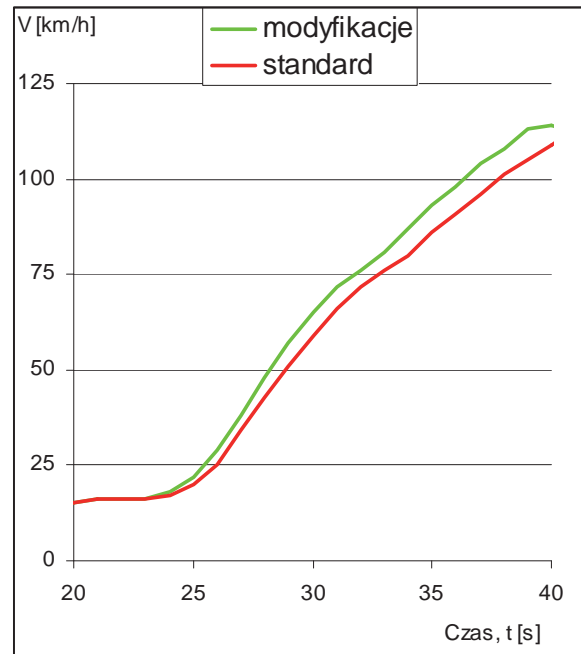
Porównując charakterystyki (rys. 5 i rys. 6) można zaobserwować duże podobieństwo przebiegu zmian mocy i momentu. Są także obserwowane pewne różnice, szczególnie widoczne w zakresie wyższej prędkości obrotowej silnika. Charakterystyki obfitują bowiem w duże skoki wartości przypadające na niewielkie zmiany prędkości obrotowej. Jest to wynikiem stosowanej metody obliczeniowej oraz wprowadzanych danych prędkości i czasu, których kolejne wartości zmieniają się w sposób skokowy nie oddając ciągłego charakteru zmian prędkości. Zastosowanie wielomianowej linii trendu o odpowiednio wysokim stopniu umożliwia uzyskanie uśrednionego przebiegu charakterystyk, który bardziej odpowiada rzeczywistym przebiegom.

4. Interfejs diagnostyczny

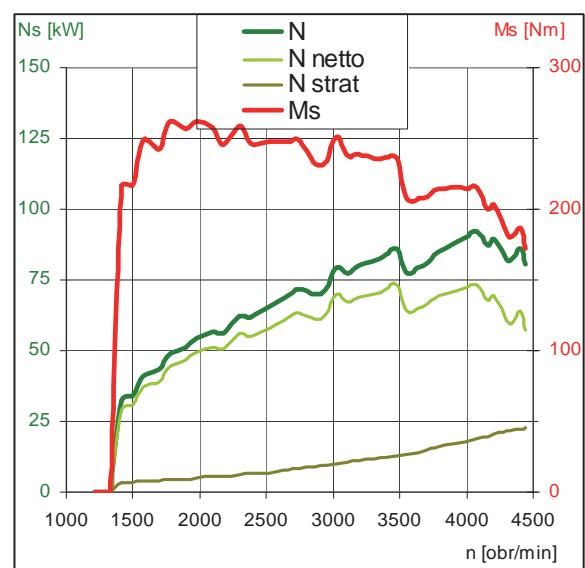
Standardowo interfejs diagnostyczny OBD służy do kontroli funkcjonowania silnika, można go jednak wykorzystać w nietypowym celu. Poza kodami błędów system OBD umożliwia odczyt wybranych parametrów pracy silnika i pojazdu [6, 8]. Poniżej przedstawiono możliwość wykorzystania informacji o prędkości pojazdu w celu oceny mocy silnika na przykładzie samochodu osobowego VW Golf IV [3]. Do komunikacji z pojazdem wymagany jest tester diagnostyczny, który podłącza się do komputera do pojazdu. Po prawidłowym podłączeniu



Rys. 8. Złącze diagnostyczne OBD II/EOBD wykorzystywane w badaniach (VW Golf IV 1,9 TDI)
 Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 9. Przebieg rozpędzania pojazdu – sterowanie standardowe i modyfikowane VW Golf IV 1,9 TDI
 Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 10. Charakterystyka zewnętrzna pojazdu na podstawie danych uzyskanych poprzez gniazdo OBD samochodu VW Golf IV 1,9 TDI
 Źródło: Opracowanie własne.

włączamy zapłon a następnie uruchamiamy program diagnostyczny dla pojazdów z grupy VW/Audi/SEAT/Skoda. Jedno z okien dialogowych (rys. 7) umożliwia obserwację i rejestrację prędkości pojazdu. Dalszy tok rozumowania i analizy jest analogiczny jak w przypadku omawianego wcześniej urządzenia Dynomet.

Urządzenie diagnostyczne nie podaje w prosty sposób wyników pomiaru mocy czy momentu obrotowego, ale umożliwia ocenę porównawczą silników na podstawie czasu rozpędzania (rys. 9) lub przy dodatkowym wykonaniu serii obliczeń umożliwia wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej silnika. Informacja o szybkości liniowej pojazdu w powiązaniu z informacją na temat przełożenia układu napędowego i obwodu tocznego koła pozwala uzyskać charakterystyki prezentowane na rys. 10.

Podsumowanie

W przeszłości, gdy nie było jeszcze elektronicznych sterowników silnikowych oraz równie wyspecjalizowanych urządzeń diagnostycznych trakcyjne badania eksploatacyjne były uciążliwe i wiązały się z długimi przygotowaniem oraz koniecznością instalowania na pojeździe szeregu czujników. Alternatywę dla badań drogowych stanowiło podwoziowe stanowisko dynamometryczne, jednakże dostęp do takiego stanowiska był ograniczony.

Obecnie testery diagnostyczne stanowią uzupełnienie wyposażenia badawczego niejednej placówki naukowej i jak widać na podstawie prezentowanych przykładów mogą stanowić cenne źródło informacji. Mankamentem tego sposobu pozyskiwania danych jest ograniczenie w postaci niewielkiej częstotliwości próbkowania, co wiąże się ze stosunkowo niską rozdzielczością prędkości oraz kłopotliwą obróbką wyników. Jednakże warto zwrócić uwagę na zalety tej metody wynikające między innymi z łatwego dostępu do danych oraz niskich kosztów interfejsów komunikacyjnych.

Podsumowując należy podkreślić, że w przypadku wstępnej oceny mocy jednostki napędowej pojazdu zaprezento-

wane metody badań drogowych z wykorzystaniem interfejsu OBD pozwalają na uzyskanie oczekiwanych informacji i mogą służyć jako ekwiwalent kosztowniejszych, choć co prawda dokładniejszych metod pomiarowych.

Bibliografia

1. Arczyński. S.: *Mechanika ruchu samochodu*. WNT, Warszawa 1994.
2. Gajek A., Juda Z.: *Czujniki. Mechatronika samochodowa*. WKiŁ, Warszawa 2008.
3. Kuranc A.: *Wybrane przykłady badań silników spalinowych z wykorzystaniem współczesnych testerów diagnostycznych*. Eksploatacja Silników Spalinowych. Zeszyt Nr 16. ISSN 1509-9237, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2007.
4. Kuranc A.: *Vehicle traction examination in the aspect of evaluation of the drive unit power*. Problemy Budowy oraz Eksploatacji Maszyn i Urządzeń Rolniczych. Politechnika Warszawska, Płock 2006.
5. Lanzendoerfer J.: *Badania pojazdów samochodowych*. WKiŁ, Warszawa 1977.
6. Myszkowski St.: *Diagnostyka pokładowa standard OBD II/EOBD*. Poradnik serwisowy nr 4, Wydawnictwo INSTALATOR POLSKI, Warszawa 2003.
7. Orzełowski S.: *Eksperymentalne badania samochodów i ich zespołów*. WNT, Warszawa 1995.
8. *VAG-COM Diagnostic Software for VW/Audi/SEAT/Skoda – Version 409.0 Copyright (c) 2000-2004 by Ross-Tech, LLC*. 920 South Broad Street Lansdale, PA 19446.
9. Vierling F.: *Moderne Leistungs- und Abgasrühverfahren. Grundlagen*, Technik, Adwendung. Krafthand Verlag Walter Schultz GmbH, Bad Wörlshofen 2010.
10. <http://www.race-technology.com/wiki/index.php/Hardware/AX22/>
11. http://www.corrsys-datron.com/Support/PDF_Downloads/200-632e-06.10.pdf
12. <http://www.dynomet.dk>

Vehicle engine's power testing based on inertial methods

The paper summarises and briefly characterises selected test methods leading to estimation of the vehicle's engine power. The main attention has been focused on methods widely available, and therefore based on less expensive, but often less precise equipment, which is set on an analysis of the process of acceleration of the vehicle. The paper also presents examples of the results of research carried out in road conditions.

Key words: combustion engine, power, dynamometer, vehicle testing.

Autor:

dr inż. **Andrzej Kuranc** – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie