

**Mirosław Karczewski, Leszek Szczęch**

Wojskowa Akademia Techniczna

Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu

00-908 Warszawa, ul. ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

e-mail: mkarczewski@wat.edu.pl; lszczech@wat.edu.pl

## **POMIARY OPORÓW WEWNĘTRZNYCH SILNIKA SPALINOWEGO**

### **STRESZCZENIE**

W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki pomiarów oporów wewnętrznych silnika o zapłonie samoczynnym. Określono opory ruchu wprowadzane przez poszczególne układy: układ korbowo-tłokowy, rozrządu, chłodzenia, smarowania i elektryczny związane bezpośrednio z pracą silnika. Określono procentowy udział strat mocy na napęd poszczególnych układów silnika.

#### Słowa kluczowe:

opory wewnętrzne silnika, badania silnika.

### **WSTĘP**

Współczesny silnik spalinowy jest maszyną energetycznie niedoskonałą, której sprawność ogólna nie przekracza 45% (55% w silnikach wolnoobrotowych). Oznacza to, że jedynie część energii chemicznej zawartej w paliwie jest zamieniana na pracę użyteczną i może być efektywnie wykorzystana. Pozostała część jest tracona: straty wylotu lub chłodzenia (do których będą wliczane straty tarcia w mechanizmach), a także wykorzystywana do pokonania oporów wewnętrznych stawianych przez urządzenia niezbędne do podtrzymania pracy silnika (rozrząd, pompy płynów eksploatacyjnych, pompa wtryskowa i inne).

Straty wynikają między innymi z dużej dynamiki pracy silnika i zmiennych warunków przebiegu procesu spalania w silniku oraz konieczności pokonywania sił oporów powstających podczas napędzania układów pomocniczych silnika.

Straty występujące w trakcie pracy silnika spalinowego dyktują poziom osiąganą przez niego sprawności. Dążenie do uzyskania jak najwyższego jej poziomu ma kluczowy wpływ na wiele aspektów współczesnej motoryzacji związanych zarówno z ciągle zaostżanymi wymaganiami dotyczącymi emisji związków toksycznych do atmosfery, jak i zmniejszeniem zużycia paliwa.

Ważnym aspektem jest więc zlokalizowanie miejsc powstawania strat oraz oszacowanie ich udziału w całkowitej wartości oporów powstających podczas pracy silnika spalinowego.

Celem pracy było opracowanie metodyki i określenie bilansu oporów własnych silnika o zapłonie samoczynnym. Bilans wyznaczono na przykładzie silnika Citroen 1.4 HDI. Zakres pracy obejmował:

- określenie struktury bilansu mocy;
- opracowanie metodyki badań, budowy i oprzyrządowania stanowiska do pomiaru oporów własnych silnika;
- określenie wpływu poszczególnych układów silnika na wartość mocy oraz oporów własnych.

## **BILANS MOCY SILNIKA**

Wartość oporów własnych silnika to ta część mocy silnika, która jest bezpowrotnie tracona na pokonywanie oporów, do których należą:

- opory tarcia współpracujących ze sobą elementów;
- opory wentylacyjne ruchu elementów w atmosferze powietrza;
- opory wynikające z konieczności napędu wszystkich układów silnika niezbędnych do jego poprawnej pracy.

Osiągi silnika w znacznym stopniu zależą od własności paliwa wykorzystywanego do jego zasilania. Poszczególne składowe realizowanego w silniku spalinowym procesu zamiany energii można przedstawić w postaci bilansu mocy silnika.



ładunkiem. Wielkość tych strat określa się przeciwiścieniami w przewodach wlotowych i wylotowych, i zależy od warunków pracy silnika, jego rozmiarów konstrukcji i regulacji organów wymiany ładunku.

Straty mocy na napęd mechanizmów pomocniczych ( $N_p$ ) składają się ze strat mocy na napęd agregatów, bez których niemożliwa jest normalna praca silnika, a szczególnie pompy wtryskowej (w przypadku silników o zapłonie samoczynnym), pompy wodnej i pompy oleju, alternatora, w przypadku silników o zapłonie iskrowym układu zapłonowego oraz wentylatora (zarówno w przypadku chłodzenia wodnego, jak i powietrznego). Straty mocy na napęd agregatów pomocniczych zależą od ich konstrukcji, wielkości i stanu technicznego.

Straty wentylacyjne mocy ( $N_k$ ) uwzględniają straty mocy na pokonywanie oporów gazów i cząstek oleju w skrzyni korbowej przez elementy układu korbowego, na pokonywanie oporów gazów i powietrza przez wirnik turbosprężarki czy też oporów powietrza przez koło zamachowe.

Sumaryczne straty mechaniczne można więc przedstawić następująco:

$$N_m = N_t + N_w + N_p + N_k. \quad (2)$$

W pracy skupiono się przede wszystkim na oszacowaniu dwóch największych składników strat mechanicznych: strat na tarcie i strat na napęd urządzeń zewnętrznych.

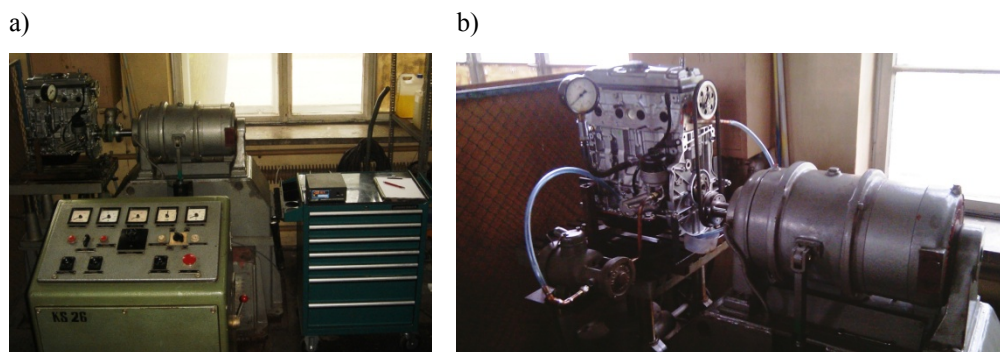
## OBIEKT BADAŃ I METODYKA POMIARÓW

Podstawowe badania zostały przeprowadzone na silniku francuskiego koncernu Citroen 1.4 HDI o mocy 51.5 kW przy prędkości 4000 obr/min i momencie obrotowym 150 Nm (1750 obr/min).

Wykorzystano kilka metod wyznaczania oporów wewnętrznych silnika. Podstawową metodą jest metoda obcego napędu. Opiera się ona na wykorzystaniu zewnętrznego źródła napędu do wprowadzenia w ruch badanego układu i pomiarze mocy niezbędnej do utrzymania tego ruchu.

Do pomiarów oporów ruchu układu tłokowo-korbowego i rozrządu w artykule zostało wykorzystane stanowisko pomiarowe z silnikiem elektrycznym o mocy

19 kW wyposażonym w układ do pomiaru momentu obrotowego silnika napędowego stanowiska.



Fot. 1. Stanowisko do pomiaru oporów pracy:  
a) układu korbowo-tłokowego; b) układu rozrządu

*Źródło: zdjęcia wykonane przez autorów.*

Opór wprowadzany przez pompę olejową oszacowano metodą różnicową, dokonując pomiaru oporów układu korbowo-tłokowego z podłączoną pompą olejową i bez niej (pompa olejowa w tym silniku jest napędzana poprzez łańcuch od wału korbowego). W trakcie badań układu rozrządu i badań układu korbowo-tłokowego bez wewnętrznej pompy olejowej silnik był smarowany za pomocą zewnętrznej pompy olejowej o identycznym wydatku i ciśnieniu.

Pomiary oporów pompy wysokiego ciśnienia układu CR przeprowadzono na stanowisku do badania układów CR. W trakcie pracy mierzono parametry elektryczne silnika napędzającego pompę wysokiego ciśnienia z układu CR.

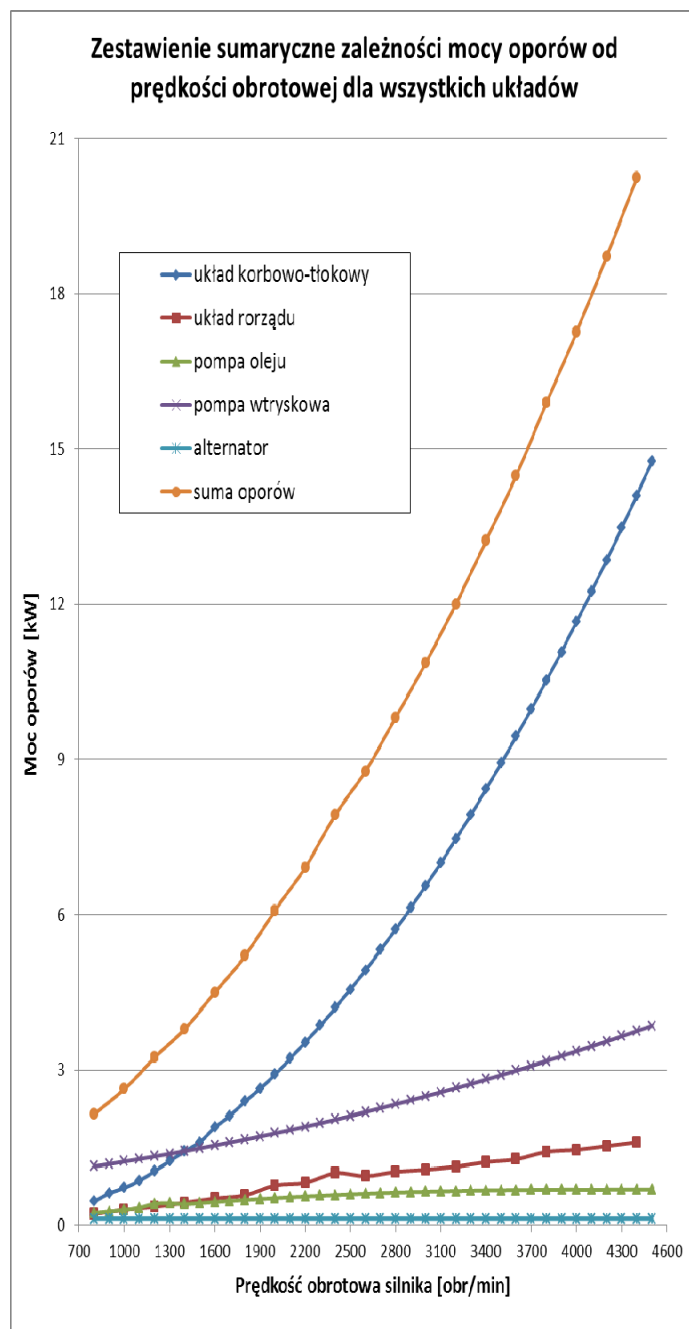
Moc traconą na napęd alternatora zmierzono na silniku zabudowanym w pojeździe, mierząc parametry elektryczne alternatora w całym zakresie prędkości obrotowych silnika. Oświetlenie pojazdu było wyłączone. Nie uwzględniono także wzrostu oporu alternatora spowodowanego wentylatorami w układzie chłodzenia silnika. Próbowano natomiast określić opory wprowadzane przez pompę układu chłodzenia, jednak w porównaniu z oporami całego układu korbowo-tłokowego okazały się one znikome i były trudne do jednoznacznego określenia. W tabeli 1. zestawiono wyniki pomiarów mocy pobieranej przez poszczególne układy w funkcji prędkości obrotowej silnika.

Tabela 1. Zbiorcze zestawienie mocy oporów wszystkich badanych układów

	Układ korbowo-tłokowy	Układ rozrządu	Pompa oleju	Pompa wtryskowa	Alternator	Suma
n	N	N	N	N	N	N
obr/min	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
800	0,45	0,21	0,23	1,13	0,12	2,14
1000	0,71	0,29	0,29	1,22	0,12	2,63
1200	1,04	0,34	0,41	1,32	0,12	3,23
1400	1,42	0,43	0,40	1,42	0,12	3,79
1600	1,89	0,51	0,44	1,53	0,12	4,49
1800	2,38	0,57	0,48	1,65	0,12	5,20
2000	2,91	0,76	0,51	1,77	0,12	6,08
2200	3,52	0,82	0,55	1,90	0,12	6,91
2400	4,19	1,00	0,57	2,04	0,12	7,93
2600	4,92	0,95	0,60	2,18	0,12	8,77
2800	5,71	1,03	0,62	2,33	0,12	9,81
3000	6,55	1,07	0,64	2,48	0,12	10,86
3200	7,46	1,12	0,65	2,64	0,12	12,00
3400	8,42	1,21	0,66	2,81	0,12	13,23
3600	9,44	1,27	0,67	2,99	0,12	14,48
3800	10,52	1,41	0,67	3,17	0,12	15,89
4000	11,65	1,45	0,68	3,35	0,12	17,25
4200	12,85	1,52	0,68	3,55	0,12	18,71
4400	14,10	1,59	0,68	3,75	0,12	20,24

Źródło: opracowanie własne.

Po naniesieniu wszystkich uzyskanych przebiegów na jeden wspólny wykres można zobaczyć, że największa część mocy pochłaniana jest na napęd układu korbowo-tłokowego. Charakterystyka dla tego układu posiada również największe tempo wzrostu oporów ze wzrostem prędkości obrotowej. Natomiast obciążenie ze strony układu elektrycznego jest od prędkości obrotowej niezależne.



Rys. 1. Charakterystyka oporów wewnętrznych silnika w funkcji prędkości obrotowej dla poszczególnych układów

Źródło: opracowanie własne.

## WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że moc pochłaniana na pokonywanie oporów własnych badanego silnika stanowi znaczną część jego mocy maksymalnej. Przykładowo, przy prędkości obrotowej mocy maksymalnej w trakcie rozgrzewania silnika (temperatura oleju 43°C) wartość mocy pochłanianej na pokonywanie oporów stanowi prawie jedną trzecią jego mocy. Wynika z tego, że wartość oporów wewnętrznych jest jedną z głównych przyczyn występowania niskiej sprawności silnika, nad której ograniczeniem powinny być w przyszłości prowadzone prace badawcze.

Udział w ogólnym bilansie strat generowanych przez poszczególne układy określony dla prędkości obrotowej mocy maksymalnej przedstawia się następująco:

- układ korbowo-tłokowy 67,5%;
- pompa wtryskowa 19,4%;
- układ rozrzędu 8,4%;
- pompa oleju 3,9%;
- alternator 0,7%.

Głównym źródłem oporów własnych silnika spalinowego jest układ korbowo-tłokowy. Udział strat powstających podczas pracy tego układu w porównaniu do całkowitej wartości strat stanowi od około 20% dla prędkości obrotowej biegu jałowego do prawie 70% dla maksymalnej prędkości obrotowej. Rozwiązaniem tego problemu może być zmiana posuwisto-zwrotnego sposobu pracy, charakterystycznego dla przeważającej liczby rozwiązań silników, na inny — powodujący mniejsze straty. Przykładem tego może być konstrukcja silnika Wankla, w której tłok wykonuje ruch krążący. Rozwiązanie to jednak ze względu na skomplikowaną konstrukcję nie jest wykorzystywane na szeroką skalę.

Temperatura oleju wywiera znaczny wpływ na wartość oporów własnych silnika. Zgodnie z przyjętym na potrzeby pracy uproszczonym sposobem określania wpływu temperatury na wartość oporów własnych, wzrost temperatury oleju o 10°C pociągał za sobą spadek momentu oporów o około 1,4 Nm. Jest to wywołane zmianą lepkości oleju w funkcji temperatury, która w znacznym stopniu wpływa na poziom oporów współpracy elementów smarowanych.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Podrażka Ł., *Bilans mocy silników spalinowych*, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2011.
- [2] Stepnowski K., *Analiza obciążeń w układzie zasilania silników o ZS*, praca dyplomowa, WAT, Warszawa 2010.

## INVESTIGATION OF INTERNAL RESISTANCE OF A DIESEL ENGINE

### ABSTRACT

Methodics and results of losses investigation of a diesel engine are described in the paper. There are showed power losses connected with engine mechanism work: piston-crank shaft, camshaft, injection pump, lubrication and electric supply. Percentage ratio of power lost in particular engine mechanism is determined.

Keywords:

engine losses, engine investigation.