

ANALIZA SYGNAŁÓW ROZRUCHU SILNIKA SPALINOWEGO

W artykule omówiono sygnały rejestrowane podczas napędzania wału korbowego silnika przez rozrusznik oraz opisano wpływ wartości temperatury i mocy układu rozruchowego na rejestrowane sygnały. Przedstawiono stanowisko oraz metodykę badań rozruchu silnika spalinowego. Wskazano źródła oporów w silniku spalinowym oraz omówiono czynniki mające na niego wpływ, wskazano jego składowe oraz zależności pozwalające na jego wyznaczenie. Wykazano, że szczelność przestrzeni nadłokowej ma istotny wpływ na wartość oporów silnika spalinowego, a przez to na wartość rejestrowanych podczas napędzania wału korbowego sygnałów.

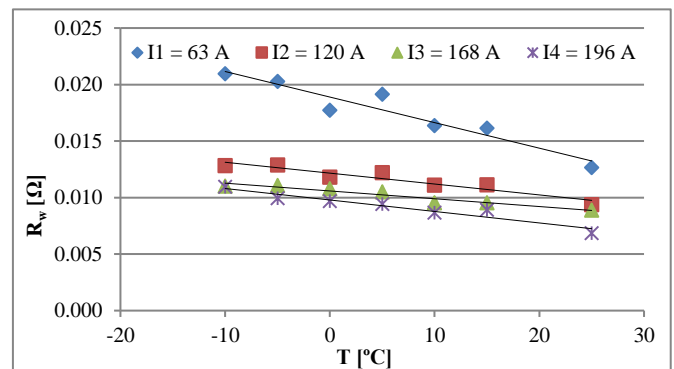
WSTĘP

Podjęcie przez silnik spalinowy samodzielnej pracy wymaga dostarczenia dodatkowej energii. Źródło energii stanowi akumulator kwasowo-ołowiowy, który jest elementem układu rozruchowego silnika. Energia elektryczna pobierana z akumulatora podczas rozruchu zamieniana jest przez rozrusznik na energię mechaniczną. Rozrusznik, za pomocą przekładni zębatej, napędza wał korbowy silnika spalinowego oraz pozostałe jego elementy połączone kinematycznie z wałem korbowym. Prędkość obrotowa wału korbowego podczas napędzania przez rozrusznik jest determinowana przez moc układu rozruchowego oraz moment oporów ruchu silnika spalinowego. Istotny wpływ na prędkość obrotową wału korbowego podczas napędzania ma temperatura otoczenia, jeżeli silnik znajduje się w równowadze termicznej z otoczeniem. Szczególne znaczenie ma to dla rozruchu silników o zapłonie samoczynnym, w których do rozpoczęcia samodzielnej pracy konieczne jest wytworzenie odpowiednich warunków termodynamicznych w komorze spalania. O ile dodatnie w skali Celsjusza wartości temperatury nie stwarzają większych problemów podczas uruchamiania silnika (przy dobrym jego stanie technicznym), to wartości ujemne sprawiają, że rozruch silnika spalinowego jest utrudniony, a czasem wręcz niemożliwy. Wraz ze zmniejszaniem się wartości temperatury zmieniają się właściwości reologiczne materiałów pędnych i smarów. Zwiększa się lepkość oleju silnikowego, co powoduje wzrost oporów ruchu wału korbowego. Ponadto większa lepkość paliwa, zwłaszcza oleju napędowego powoduje, że nie jest ono w dostatecznym stopniu rozdrobnione, a to wydłuża czas niezbędny do wytworzenia mieszanki zdolnej do samozapłonu. Ponadto wraz z obniżaniem się wartości temperatury wzrasta wartość rezystancji wewnętrznej akumulatora (rys. 1), co powoduje spadek mocy układu rozruchowego. Wynika to z tego, że w obniżonej temperaturze zwiększa się lepkość elektrolitu, co powoduje, że zmniejsza się ruchliwość jonów będących nośnikami ładunku elektrycznego, a przez to przewodność elektryczna elektrolitu.

Czynniki te powodują zmniejszenie wartości prędkości obrotowej wału korbowego podczas napędzania przez rozrusznik. Zmniejszenie wartości prędkości obrotowej w ujemnej wartości temperatury powoduje, że rozruch silnika spalinowego staje się trudniejszy, a ponadto wydłuża się czas niezbędny do podjęcia samodzielnej pracy, co dodatkowo obciąża układ rozruchowy.

Podczas napędzania wału korbowego silnika w warunkach ujemnej wartości temperatury można wyróżnić dwie główne fazy rozruchu: faza pierwsza – rozpoczyna się w momencie włączenia rozrusznika i kończy się z chwilą wystąpienia pierwszych zapłonów

w komorze spalania, faza druga – rozpoczyna się w momencie wystąpienia pierwszych zapłonów i trwa do chwili podjęcia przez silnik samodzielnej pracy.



Rys.1. Zmiany rezystancji wewnętrznej akumulatora o pojemności $Q_{zn} = 110 \text{ Ah}$ w funkcji temperatury dla różnych stanów obciążenia prądowego $I1 \div I4$

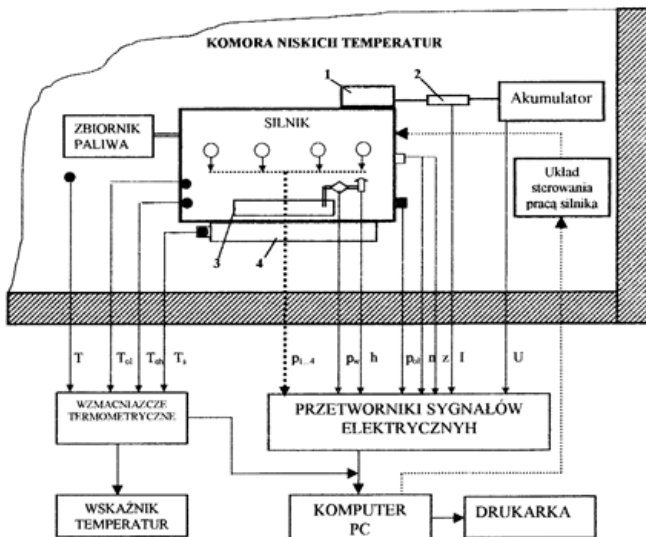
W aspekcie opracowywania metody diagnostycznej pozwalającej wyznaczyć wartość ciśnienia sprężania w cylindrach kluczowe znaczenie ma znajomość procesów zachodzących w pierwszej fazie rozruchu, w której realizowane są procesy tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej zdolnej do samozapłonu. Szybkość tych procesów jest determinowana przez prędkość obrotową wału korbowego, która z kolei zależy od stanu technicznego silnika, a przez to od wartości natężenia pobieranego prądu oraz wartości napięcia mierzonego na zaciskach akumulatora podczas napędzania wału korbowego.

Celem artykułu jest analiza sygnałów rejestrowanych podczas pierwszej fazy rozruchu pod kątem informacji diagnostycznej. Jako podstawowe wielkości o znaczeniu diagnostycznym rejestrowane są: natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora, prędkość obrotowa wału korbowego wymuszana przez rozrusznik oraz ciśnienie sprężania ładunku w cylindrach. Wartość natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego zawiera informację o ogólnym stanie technicznym układu rozruchowego, a także zawiera informacje o wielkości momentu oporów silnika spalinowego. Napięcie mierzone na zaciskach obciążonego akumulatora dostarcza informacji o stanie źródła zasilania, charakteryzuje jego zdolność do oddawania energii elektrycznej i zależy od stanu technicznego oraz stopnia naładowania akumulatora, temperatury elektrolitu i natężenia pobieranego prądu. Prędkość obrotowa wału korbowego dostarcza informacji

o stanie układu rozruchowego i silnika, jako elementów współpracujących ze sobą podczas uruchamiania silnika spalinowego.

1. STANOWISKO I METODYKA BADAŃ

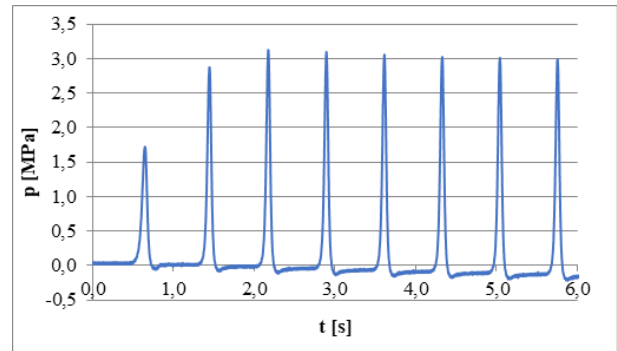
Badanie sygnałów rozruchu (napędzania wału korbowego) silnika spalinowego możliwe jest przy zastosowaniu odpowiedniej metodyki oraz stanowiska pomiarowego umożliwiającego rejestrację sygnałów. Metodyka badań silników opisana jest zazwyczaj w odpowiednich normach traktujących o badaniach rozruchowych silników spalinowych w obniżonej temperaturze. Normy te opisują sposób realizacji badań jak również stanowisko, na którym możliwe jest przeprowadzenie badania. Stanowisko pozwalające realizować badania rozruchowe silników spalinowych w Wydziale Mechanicznym WAT zbudowano na bazie komory klimatycznej. Umożliwia ona płynną regulację wartości temperatury w szerokim zakresie jej zmienności. Obiektem badań jest silnik o zapłonie samoczynnym niedoładowany 4-ro cylindrowy AD4.236 wyposażony w elektryczny układ rozruchowy. Pozostałe elementy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



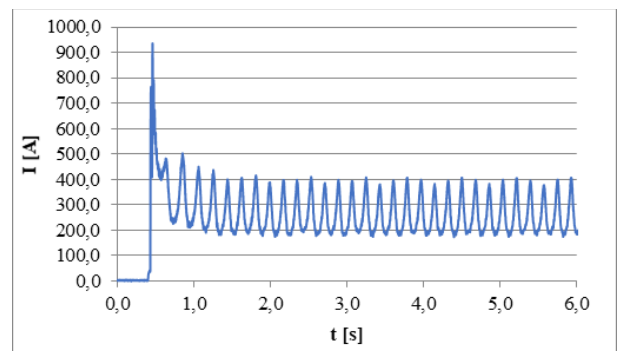
Rys.2. Schemat funkcjonalny stanowiska do badań silnika spalinowego i układu rozruchowego [3]: 1 – rozrusznik; 2 – sonda LEM do pomiaru natężenia prądu; 3 – pompa wtryskowa; 4 – kolektor dolotowy ze świecą płomieniową; tory pomiarowe wielkości fizycznych: T – temperatura otoczenia; T_{oi} – temperatura oleju silnikowego; T_{ch} – temperatura płynu chłodzącego; T_s – temperatura powietrza w kolektorze dolotowym; $p_{1..4}$ – ciśnienia indykowane w cylindrach; p_w – ciśnienie wtrysku paliwa; h – wznios iglicy wtryskiwacza; p_{oi} – ciśnienie oleju; n – prędkość obrotowa wału korbowego silnika; z – znacznik położenia wału korbowego; I – natężenie prądu rozrusznika; U – napięcie akumulatora.

Stanowisko zostało wyposażone w komputerowy system pomiarowy: czujniki i przetworniki sygnałów oraz analogowo-cyfrową kartę pomiarową. Układ umożliwia rejestrowanie parametrów pracy układu rozruchowego i silnika, w tym ciśnienia sprężania w każdym jego cylindrze. Komora termiczna umożliwia przeprowadzenie badań w ujemnej wartości temperatury. Silnik wraz z układem rozruchowym przebywa w danej temperaturze 12 godzin w celu wyrównania temperatury. Po tym czasie realizowana jest próba rozruchowa (napędzania wału korbowego), w trakcie której rejestrowane są parametry: natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik, napięcie na zaciskach obciążonego akumulatora, prędkość obrotowa wału korbo-

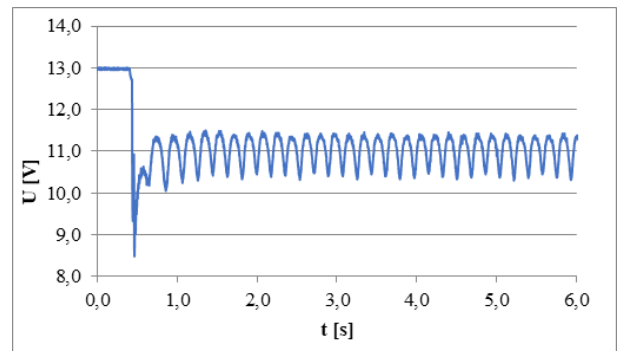
wego oraz ciśnienie w komorze spalania każdego cylindra. Dodatkowo stanowisko wyposażono w tory pomiaru wartości temperatury: otoczenia, oleju silnikowego, cieczy chłodzącej oraz powietrza w kolektorze dolotowym. Przebiegi rejestrowanych parametrów pracy silnika i układu rozruchowego przedstawiono na rys. 3 ÷ 6.



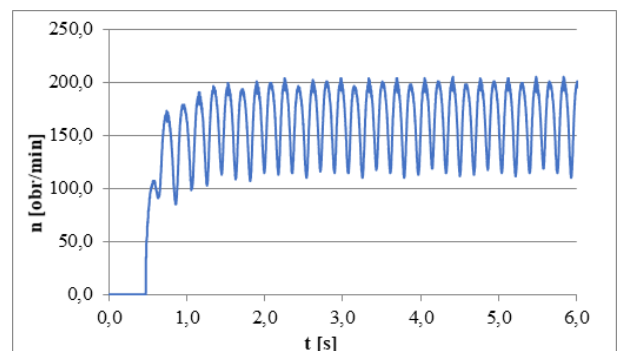
Rys.3. Przebieg ciśnienia sprężania w cylindrze badanego silnika



Rys.4. Przebieg natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika



Rys.5. Przebieg napięcia mierzonego na zaciskach obciążonego akumulatora



Rys.6. Przebieg prędkości obrotowej wału korbowego silnika napędzanego przez układ rozruchowy

Po każdej próbie rozruchowej silnik jest uruchamiany i rozgrzewany do momentu osiągnięcia temperatury eksploatacyjnej, ponadto ładowano akumulator do pełnej pojemności znamionowej.

2. OPÓR NAPĘDZANIA WAŁU SILNIKA SPALINOWEGO

Napędzanie wału korbowego przez układ rozruchowy wymaga pokonania oporu silnika spalinowego, który w pierwszych chwilach po włączeniu rozrusznika ma największą wartość i zmniejsza się wraz z czasem działania rozrusznika. Opór napędzania wału korbowego wpływa bezpośrednio na prędkość obracania wału korbowego przez rozrusznik. Jego wartość jest zmienna w trakcie napędzania wału korbowego, a ponadto zmienia się istotnie wraz ze zmianą wartości temperatury. W ujemnych wartościach temperatury zmieniają się właściwości reologiczne oleju silnikowego, w tym jego lepkość, co powoduje wzrost wartości oporu ruchu wału korbowego. Sumaryczna wartość oporu silnika jest wartością zmienną wynikającą z cech konstrukcyjnych silnika, właściwości reologicznych oleju silnikowego, cykliczności pracy silnika spalinowego oraz bezwładności ruchomych części silnika napędzanych podczas rozruchu.

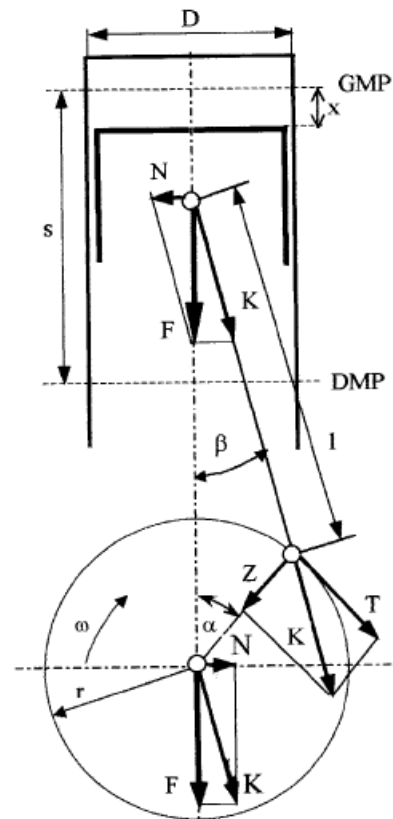
2.1. Źródła oporów ruchu w silniku spalinowym

Wprawienie wału korbowego silnika spalinowego w ruch obrotowy wymaga pokonania oporów ruchu (tarcia) współpracujących węzłów kinematycznych silnika spalinowego m.in. łożysk głównych i korbowodowych wału korbowego oraz skojarzeniu T-P-C. Wartość oporu ruchu pochodzącego od tarcia w warunkach dodatniej wartości temperatury jest mniejsza w skojarzeniu panewka czop wału korbowego w stosunku do wartości oporu powstałego w wyniku tarcia pierścieni tłokowych i tłoka o gładź cylindra. Przy ujemnej wartości temperatury zmianie ulegają właściwości reologiczne oleju silnikowego, w tym zwiększa się jego lepkość, co prowadzi do wzrostu oporów ruchu wału korbowego silnika spalinowego. Opór ruchu wału korbowego wynikający z tarcia współpracujących elementów przyjmuje w stałej wartości temperatury wartości stałe. Jego nieznaczna zmiana (jeżeli występuje) może wynikać z czasu realizacji próby rozruchowej i niewielkiej zmiany wartości temperatury oleju smarującego w skojarzeniu czop wału korbowego-łożysko ślizgowe w wyniku nagrzewania się współpracujących elementów oraz dostarczania do skojarzenia świeżego oleju.

Wartość rozruchowego momentu oporów silnika spalinowego zmienia się cyklicznie podczas pracy silnika wskutek realizacji procesu sprężania i rozprężania ładunku powietrza w cylindrach oraz wskutek związanego z tym dodatkowego obciążenia wału korbowego. Obciążenie to wywoływane jest przez ciśnienie gazu, jakie sprężony ładunek wywiera na denko tłoka, a które poprzez piastę tłoka i sworzeń przenosi się na korbowód, a następnie na czop wału korbowego. Na rysunku 7 pokazano rozkład sił w układzie korbowodowym, które biorą udział w powstawaniu i przenoszeniu momentu oporów ruchu wału korbowego. Ciśnienie sprężanego ładunku powoduje powstawanie siły bocznej N , a to powstawanie dodatkowego oporu w postaci tarcia płaszcza tłoka o ścianki cylindra. Ponadto siła gazowa rozkłada się w osi sworznia tłoka na składową normalną N , której wpływ na moment oporów ruchu wyjaśniono powyżej, i siłę korbowodową K , działającą w osi korbowodu, która w osi czopu korbowodowego rozkłada się na składową styczną T oraz składową promieniową Z . Składowa styczna podczas sprężania ładunku stanowi dodatkowe źródło momentu oporów ruchu związanego z tarciami w łożyskach wału korbowego.

Opór napędzania wału korbowego zależy również od dodatkowych elementów osprzętu silnika, które wprawiane są w ruch od wału korbowego podczas napędzania go przez rozrusznik. Są to głównie

elementy układu rozrządu, układu zasilania w paliwo, układu smarowania (pompa oleju), alternator, niekiedy mechaniczna sprężarka doładowująca, czy sprężarka powietrza montowana głównie w samochodach dostawczych i ciężarowych.



Rys.7. Rozkład sił powstających w układzie korbowo-tłokowym [3]

W literaturze dostępne są zależności pozwalające wyznaczyć wartość momentu oporów silnika. Może on być wyznaczany na podstawie średniego ciśnienia tarcia, które w ogólnym zapisie przyjmuje postać zależności (1) [5]:

$$p_i = p_e + p_t \quad (1)$$

gdzie:

- p_i – średnie ciśnienie indykowane,
- p_e – średnie ciśnienie efektywne,
- p_t – średnie ciśnienie tarcia.

Dla warunków rozruchu średnie ciśnienie tarcia wyznacza się z zależności (2) [5]:

$$p_t = 19,6 + 11,31 \cdot \eta^{0,333} \cdot n^{0,25} \text{ [kPa]} \quad (2)$$

gdzie:

- p_t – średnie ciśnienie tarcia,
- η – lepkość dynamiczna oleju [mPas],
- n – prędkość obrotowa wału korbowego [obr/min].

Stąd wynika, że średnie ciśnienie tarcia i wartość momentu oporów ruchu wału korbowego zależy od lepkości dynamicznej oleju oraz prędkości obrotowej wału korbowego. Inną zależnością, prezentowaną w literaturze, na podstawie której możliwe jest wyznaczenie wartości momentu oporów silnika opisana jest (3) [5]:

$$M_o = k \cdot A \cdot v^a \cdot n^b \quad (3)$$

gdzie:

M_o – moment oporów ruchu [Nm],

k, a, b – parametry stałe,

A – parametr uwzględniający wymiary głównych powierzchni trących silnika [cm²],

ν – lepkość kinematyczna oleju [mm²/s],

n – prędkość obrotowa wału korbowego [obr./min].

Przykładem takiej zależności pozwalającej wyznaczyć moment oporów ruchu dla silników o zapłonie samoczynnym i liczbie cylindrów mniejszej i równej sześci jest (4).

$$M_o = 133,8 \cdot 10^{-3} V_s \nu^{0,5} n^{0,38} \quad (1)$$

gdzie: V_s – objętość skokowa silnika [dm³].

W pracy [3] zaproponowano współczynniki korygujące omawiane zależności do obliczania momentu oporu współczesnych silników spalinyowych.

2.2. Opór sprężania ładunku

Moment oporów silnika, którego źródłem są elementy silnika i jego osprzętu musi być równoważony przez moment rozrusznika. Na moment oporów silnika składają się trzy główne elementy: moment oporów tarcia w głównych skojarzeniach tribologicznych silnika, moment oporów silnika, którego źródłem jest ciśnienie sprężanych gazów w przestrzeni nadłokowej oraz moment bezwładności pochodzący od elementów wirujących silnika. Moment oporu pochodzący od tarcia współpracujących elementów ma wartość stałą, wynikającą tylko z konstrukcji współpracujących elementów oraz lepkości oleju smarującego. Moment oporów ruchu pochodzący od sił gazowych przyjmuje wartości zmienne, uzależnione od kąowego położenia wału korbowego w cyklu pracy silnika. Cykliczność pracy silnika spalinyowego powoduje, że w sumarycznej wartości momentu oporów silnika można wyodrębnić dwie składowe: składową stałą, związaną z tarciem w skojarzeniach oraz składową zmienną, wynikającą z ciśnienia ładunku w cylindrze. Bilans momentu oporów silnika można zapisać w postaci równania (5) [3]:

$$M_r = M_s + M_z + I \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

gdzie:

M_r – moment siły rozrusznika,

M_s – składowa stała momentu oporu silnika,

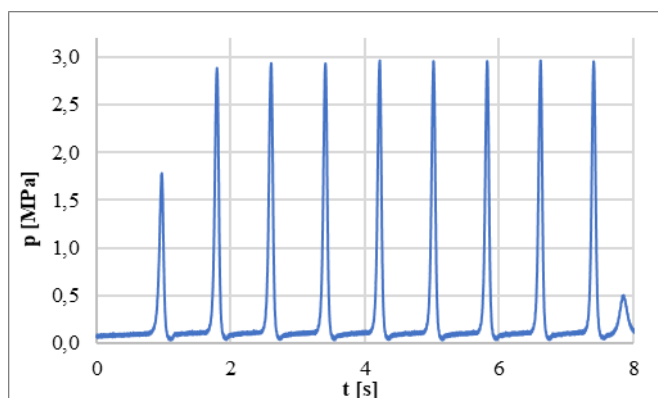
M_z – składowa zmienna momentu oporu silnika,

I – moment bezwładności elementów wirujących silnika,

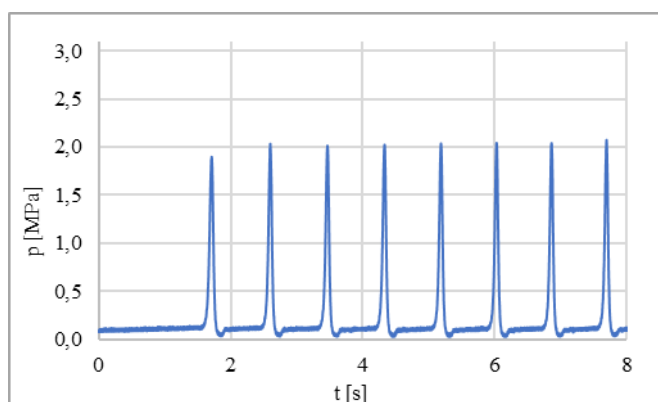
ω – prędkość kątowa wału korbowego.

Składowa zmienna, jak już wspomniano jest wynikiem sprężania ładunku w cylindrze silnika oraz rozprężania ładunku w cylindrze, w którym realizowany jest suw pracy (rozprężania). Im wartość ciśnienia sprężania jest większa, tym większa jest składowa zmienna oporu silnika. Na wartość ciśnienia sprężania wpływa głównie szczelność przestrzeni nadłokowej cylindra, która to zależy od stanu technicznego skojarzenia tłok – pierścienie tłokowe – gładź cylindra oraz szczelności skojarzenia zawór – gniazdo zaworowe. Zależy również od mocy i stanu technicznego układu rozruchowego i jego zdolności do napędzania wału korbowego silnika z odpowiednią prędkością obrotową. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przebiegi wartości ciśnienia sprężania w jednym z cylindrów silnika AD4.236 mierzone podczas napędzania wału korbowego przez rozrusznik. Rysunek 8 przedstawia przebieg ciśnienia ładunku w cylindrze bez symulacji zmiany szczelności przestrzeni nadłokowej. Na rysunku 9 natomiast

pokazano zmiany wartości ciśnienia sprężania tego samego cylindra przy symulowaniu nieszczelności przestrzeni nadłokowej.

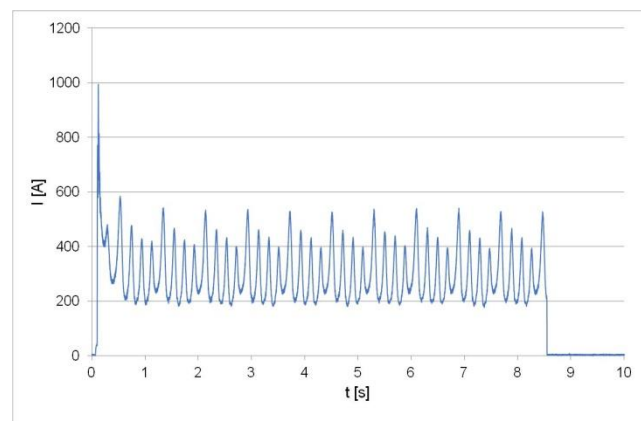


Rys. 8. Zmiany ciśnienia sprężania w cylindrze silnika bez symulowanej nieszczelności



Rys. 9. Zmiany ciśnienia sprężania w cylindrze silnika z symulowaną nieszczelnością

Zmniejszenie wartości rejestrowanego ciśnienia sprężania ładunku realizowane było poprzez kalibrowany otwór w specjalnie do tego przystosowanym rozpylaczu wtryskiwacza paliwa. Na rysunkach widać wpływ szczelności komory spalania na wartość ciśnienia w końcu suwu sprężania. W przypadku, gdy szczelność przestrzeni nadłokowej wynikała z cech konstrukcyjnych i zużycia silnika – bez symulacji nieszczelności wartość ciśnienia została zarejestrowana na poziomie bliskim 3 MPa. Przy zastosowaniu wtryskiwacza z kalibrowanym otworem do symulowania nieszczelności wartość ciśnienia sprężania zmniejszyła się do 2 MPa.



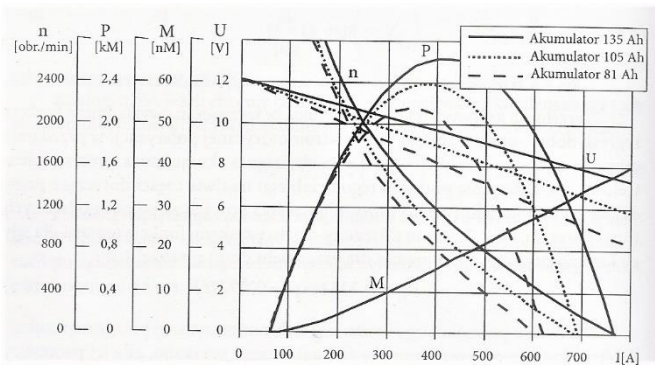
Rys. 10. Zmiany natężenia prądu rejestrowane podczas napędzania wału korbowego przez rozrusznik z symulowaną usterką

Zmiana szczelności przestrzeni nadłokowej powoduje zmianę wartości ciśnienia sprężania, a przez to zmianę wartości momentu oporów sprężania ładunku w cylindrze. Miarą oporów ruchu silnika spalinowego może być natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego, co pokazano na rys. 10.

Składowa zmienna oporów ruchu silnika, zależna od wartości ciśnienia sprężania, powoduje zmianę wartości pobieranego przez rozrusznik prądu. Wyraźnie widać mniejszą, w porównaniu do pozostałych, wartość natężenia prądu dla cylindra o najmniejszej szczelności. Jeszcze bardziej efekt ten jest widoczny w procesie rozprężania ładunku odzwierciedlanym przez minimalne wartości natężenia prądu. W przypadku cylindra o najmniejszej wartości maximum wyraźnie największa jest wartość minimalna natężenia prądu, co wynika z niskiej wartości ciśnienia w procesie rozprężania ładunku. Świadczy to o tym, że szczelność przestrzeni nadłokowej ma istotny wpływ na wartość oporów silnika. Wraz ze wzrostem szczelności przestrzeni nadłokowej wzrasta ciśnienie w końcu suwu sprężania, co powoduje, że natężenie prądu potrzebne do pokonania oporów ruchu wału korbowego ma większą wartość.

3. SYGNAŁY UKŁADU ROZRUCHOWEGO

Pokonanie przez rozrusznik momentów oporu silnika spalinowego jest możliwe wtedy, gdy jest on prawidłowo dobrany do danego silnika. Dobór rozrusznika realizowany jest na podstawie zbioru charakterystyk dostarczanych przez producenta podzespołu. Przykładowe charakterystyki rozrusznika o mocy znamionowej 1,3 kW przedstawiono na rysunku 11.



Rys.11. Charakterystyki rozrusznika o mocy 1,3 kW [3]

Pokazano tu zmiany napięcia obciążonego akumulatora U [V], prędkości obrotowej wału korbowego n [obr./min], mocy P [kW] oraz momentu obrotowego M [Nm] w funkcji natężenia prądu I [A] pobieranego przez rozrusznik w chwili napędzania wału korbowego silnika. Charakterystyki mocy i momentu obrotowego wyznaczone są na podstawie rejestrowanych podczas badań rozruchowych sygnałów układu rozruchowego tj.: prędkości obrotowej, natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik w chwili napędzania wału korbowego silnika oraz napięcia mierzonego na zaciskach obciążonego akumulatora. Średnia wartość natężenia prądu oraz charakterystyki podane przez producenta rozrusznika mogą zostać wykorzystywane do wyznaczenia wartości momentu obrotowego rozrusznika. Znając wartość przełożenia między zębniakiem a wieńcem koła zamachowego można, z zależności 6, wyznaczyć wartość prędkości kątowej rozrusznika:

$$\omega_r = i \cdot \omega_w \quad (6)$$

gdzie:

ω_r – prędkość kątowa rozrusznika,

ω_w – prędkość kątowa wału korbowego silnika spalinowego,

i – przełożenie między zębniakiem a wieńcem koła zamachowego.

Znając wartość momentu obrotowego silnika oraz prędkość kątową wału rozrusznika można wyznaczyć wartość mocy rozwijanej przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego:

$$P_r = M \cdot \omega_r \quad (5)$$

gdzie:

P_r – moc rozrusznika rozwijana w chwili rozruchu silnika

M – moment obrotowy,

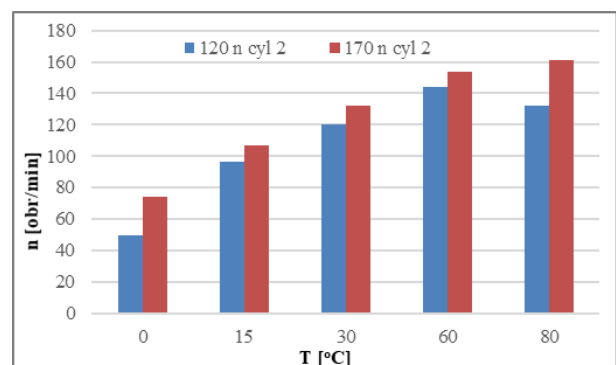
ω_r – prędkość kątowa wału rozrusznika.

Przedstawione na rysunku 11 charakterystyki sporządzono dla różnych wartości pojemności akumulatora zastosowanego jako źródło energii elektrycznej. Wynika z nich, że wzrost pojemności akumulatora powoduje wzrost parametrów pracy układu rozruchowego: zwiększenie mocy układu rozruchowego i prędkości obrotowej przy danej wartości natężenia pobieranego prądu.

Moc układu rozruchowego zależy m. in. od pojemności zastosowanego akumulatora, jego stopnia naładowania oraz stanu technicznego rozrusznika i źródła zasilania. Wartość rejestrowanych podczas prób rozruchowych sygnałów rozruchu zależy głównie od wartości momentu oporu silnika (składowej stałej oraz zmiennej), które zależą od warunków, w których przeprowadzane są próby oraz mocy układu rozruchowego. Badania rozruchowe realizowane są w warunkach równowagi termicznej badanego układu silnik-rozrusznik z otoczeniem. W przypadku badań diagnostycznych silnika na podstawie sygnałów napędzania wału korbowego, warunki równowagi termicznej mogą nie być spełnione.

Dlatego istotne jest poznanie charakteru i zakresu zmian omawianych sygnałów w warunkach napędzania wału korbowego przy braku równowagi termicznej z otoczeniem. Na rysunkach 12 ÷ 15 przedstawiono zmiany sygnałów napędzania wału korbowego przy zmiennej temperaturze silnika uzyskiwanej w trakcie jego nagrzewania po uruchomieniu w temperaturze otoczenia 0° Celsjusza dla dwóch źródeł energii elektrycznej – akumulatorów o pojemności 120 i 170 Ah. Zależności te są analizowane dla jednego wybranego cylindra nr 2 badanego silnika.

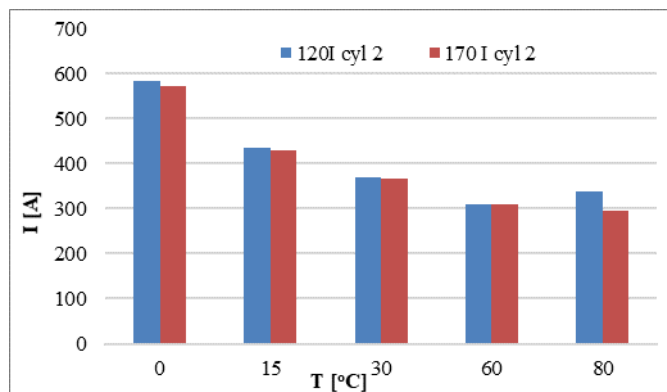
Na rysunku 12 przedstawiono zmiany prędkości obrotowej wału korbowego uzyskiwanej podczas prób jego napędzania w funkcji temperatury. Istotny wpływ na wartość rejestrowanych sygnałów ma również moc układu rozruchowego, a zwłaszcza pojemność, stan techniczny i stopień naładowania akumulatora stanowiącego źródło zasilania (o pojemności znamionowej 120Ah oraz 170 Ah).



Rys.12. Zmiany prędkości obrotowej wału korbowego w funkcji temperatury dla dwóch źródeł zasilania

Prędkość obrotowa wału korbowego silnika przyjmuje najmniejsze wartości dla najmniejszej wartości temperatury i wzrasta wraz ze wzrostem jej wartości. Wynika to ze zmiany lepkości oleju smarowego, która wzrasta przy spadku wartości temperatury. Widoczny spadek wartości prędkości obrotowej w temperaturze 80 °C w przypadku akumulatora 120 Ah, w porównaniu do poprzedniej, jest najprawdopodobniej wynikiem wzrostu oporów silnika, głównie składowej stałej związanej z tarciami w węzłach tribologicznych silnika oraz lepkością oleju smarującego. Wzrost wartości temperatury powoduje zmniejszenie lepkości oleju, co w połączeniu z oddziaływaniem ciśnienia ładunku na denko tłoka w tych warunkach termicznych może spowodować przerwanie filmu olejowego w skojarzeniu T-P-C i wzrost oporów silnika spowodowany zmianą warunków tarcia. Wartość prędkości obrotowej wału korbowego przyjmuje większe wartości podczas prób z wykorzystaniem układu o większej mocy, ponadto wartość ta rośnie wraz ze wzrostem wartości temperatury w całym zakresie jej zmienności.

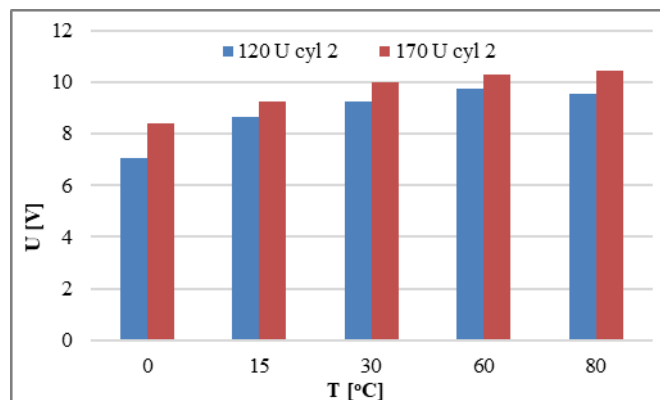
Moment oporu silnika spalinowego może być wyrażony poprzez natężenie prądu pobieranego podczas napędzania wału korbowego silnika – jest do niego proporcjonalny. Wpływ na jego wartość ma m.in. temperatura, w której realizowana jest próba napędzania wału korbowego. Na rysunku 13 przedstawiono zmiany natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego przy różnej wartości temperatury silnika. Największe wartości natężenia prądu przyjmuje dla najmniejszych wartości temperatury, co jest zrozumiałe, gdyż w tej temperaturze zmieniają warunki smarowania węzłów tribologicznych oraz lepkość oleju smarującego. Powoduje to wzrost oporów silnika spalinowego, przez co zwiększa się wartość natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego. Wzrost wartości temperatury powoduje zmianę lepkości oleju smarującego węzły silnika, przez co zmieniają warunki tarcia, a to powoduje spadek wartości oporów silnika i mniejszy pobór natężenia prądu przez rozrusznik w trakcie napędzania wału korbowego.



Rys.13. Zmiany natężenia prądu pobieranego podczas napędzania wału korbowego w funkcji temperatury dla dwóch źródeł zasilania

Dla dwóch zastosowanych akumulatorów, natężenie pobieranego prądu przyjmuje wartości inne od spodziewanych. Jego wartość dla akumulatora o pojemności znamionowej $Q_{zn} = 170$ Ah jest nieznacznie mniejsza w porównaniu z wartością dla akumulatora o mniejszej pojemności. Może to wynikać z kolejności realizacji prób rozruchowych i stosowania źródeł energii lub charakteru zależności momentu oporu od prędkości obrotowej wału korbowego. Widoczny wzrost oporów silnika przy największej wartości temperatury, obserwowany w przypadku akumulatora 120 Ah, jak już wcześniej zaznaczono, może być wynikiem zaniku filmu olejowego w skojarzeniu T-P-C i pogorszeniu warunków tarcia skojarzenia.

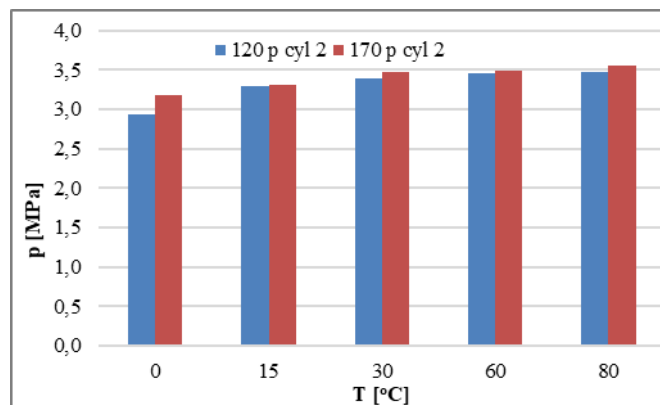
Zmiana natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego w chwili rozruchu powoduje odpowiedni spadek wartości napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora. Rysunek 14 przedstawia zmiany napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora w funkcji temperatury dla dwóch różnych źródeł zasilania rozrusznika.



Rys.14. Zmiany napięcia na zaciskach akumulatora podczas napędzania wału korbowego w funkcji temperatury dla dwóch źródeł zasilania rozrusznika

Zgodnie z prawem Ohma największy spadek napięcia rejestrowany jest w chwili poboru największej wartości natężenia prądu z akumulatora. Wartość natężenia prądu pobieranego z akumulatora jest wynikiem oporów, jakie musi pokonać rozrusznik podczas napędzania wału korbowego. Wraz ze zmianą wartości temperatury zmienia się wartość natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, czemu towarzyszy odpowiedni spadek wartości napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora. Spadek napięcia jest największy w temperaturze 0 °C i zmniejsza się wraz z jej wzrostem. Widoczne na rysunku zwiększenie spadku napięcia w temperaturze 80 °C (obniżenie wartości w stosunku do próby w temperaturze 60 °C) dla akumulatora 120 Ah, wynika z omawianej zmiany oporów silnika i związanej z tym zmiany wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas próby rozruchowej.

Spadek napięcia jest mniejszy (wartości napięcia większe) dla źródła o większej pojemności znamionowej, co jest zrozumiałe, ze względu na jego większą zdolność oddawania ładunku elektrycznego. Stwierdzone między analizowanymi parametrami pracy układu rozruchowego natężeniem pobieranego prądu napięcie na zaciskach akumulatora i prędkością obrotową wału korbowego lub rozrusznika są zgodne z tymi, jakie powinny wynikać i wynikają z relacji charakterystyk rozrusznika elektrycznego.



Rys.15. Zmiany ciśnienia w końcu suwu sprężania podczas napędzania wału w funkcji temperatury dla dwóch źródeł zasilania

Zmiana wartości temperatury wpływa również na wartość rejestrowanego ciśnienia sprężania ładunku w cylindrach, a to z kolei na wartość składowej zmiennej oporu silnika spalinowego. Na rysunku 15 przedstawiono zmiany wartości ciśnienia sprężania w funkcji temperatury. Wartość ciśnienia jest najmniejsza w temperaturze 0 °C i wzrasta wraz z jej wzrostem. Najmniejsza wartość ciśnienia zanotowana w najniższej temperaturze wynika głównie z niewielkiej, rzędu 50 obr/min prędkości obrotowej wału korbowego uzyskiwanej podczas próby rozruchu. W tych warunkach moc układu rozruchowego wykorzystywana jest głównie na pokonanie oporów silnika, które związane są z tarciami elementów napędzanych od wału korbowego silnika oraz tarciami w skojarzeniach tribologicznych silnika spalinowego. Widoczne jest także, że w miarę wzrostu temperatury wartość ciśnienia stabilizuje się – zmiany są coraz mniejsze, co jest głównie związane ze stabilizacją prędkości obrotowej (a także innych parametrów pracy układu rozruchowego).

Również ciśnienie w końcu suwu sprężania przyjmuje większe wartości w przypadku, gdy wał korbowy jest napędzany przez rozrusznik zasilany z akumulatora o większej pojemności znamionowej. Jest to niewątpliwie związane z uzyskiwanymi większymi wartościami prędkości obrotowej wału korbowego w porównaniu do próby z wykorzystaniem mniejszej mocy układu rozruchowego.

Zarówno większa wartość ciśnienia sprężania, mniejszy spadek napięcia oraz większa wartość prędkości obrotowej wału korbowego rejestrowane podczas prób rozruchowych z wykorzystaniem źródła o większej pojemności znamionowej wynikają z większej mocy układu rozruchowego. Akumulator o większej pojemności podczas próby rozruchowej jest w stanie oddać większą ilość energii elektrycznej niezbędnej do pokonania oporów silnika.

Jak wykazano powyżej, sygnały rozruchu (napędzania wału korbowego) silnika spalinowego zależą od jego momentu oporu. Składowa stała momentu oporu zależy od lepkości oleju smarowego, temperatury otoczenia, w której realizowane są próby rozruchowe, konstrukcji węzłów tribologicznych silnika oraz dodatkowych elementów napędzanych od wału korbowego. Składowa zmienna jest zależna od szczelności komory spalania i w sposób złożony od innych czynników, w tym również od mocy układu rozruchowego wykorzystywanego podczas prób rozruchowych. Poznanie tych zależności pozwoli na opracowanie metody wyznaczania ciśnienia w cylindrach na podstawie sygnałów rozruchu.

PODSUMOWANIE

Rozruchowy moment oporów silnika spalinowego jest wielkością zmienną i wynika z cykliczności realizacji procesów termodynamicznych w silniku spalinowym. Na moment oporu silnika składa się opór wynikający ze sprężania ładunku w cylindrze silnika oraz rozprężania w cylindrze, w którym realizowany jest suw pracy – składowa zmienna – oraz tarcie w węzłach tribologicznych, zależne od lepkości oleju smarowego oraz konstrukcji węzła – składowa stała. Na wartość momentu oporu istotny wpływ ma temperatura otoczenia, w której realizowana jest próba napędzania wału korbowego. Składową momentu oporu silnika jest również moment bezwładności mas wprawianych w ruch obrotowy podczas napędzania wału korbowego oraz konieczność napędzania dodatkowych elementów osprzętu silnika, które związane są z wałem korbowym. Aby silnik mógł pojąć samodzielną pracę konieczne jest dobranie mocy układu rozruchowego

zdolnego pokonać opór silnika i napędzić wał korbowy z dostatecznie dużą wartością prędkości obrotowej.

Parametry napędzania wału korbowego wykazują największą wrażliwość na zmiany oporów ruchu wału korbowego wywołane zmianą wartości temperatury, zarówno w warunkach równowagi termicznej silnika z otoczeniem, jak i jej braku.

Analiza sygnałów rozruchu tj. natężenia pobieranego prądu, spadku napięcia na zaciskach obciążonego akumulatora, prędkości obrotowej wału korbowego oraz ciśnienia w końcu suwu sprężania mogą stanowić źródło informacji diagnostycznej układu rozruchowego oraz silnika spalinowego. Na ich podstawie możliwe jest opracowanie metody wyznaczania wartości ciśnienia sprężania w cylindrach silnika.

BIBLIOGRAFIA

1. Constantinescu L., Enache B., Lefter E., *Modeling aspects of an electric starter system for an internal combustion engine*, ECAI – International Conference, Bucharest, ROMANIA, 2014.
2. Niziński S. i inni, *Diagnostyka samochodów osobowych i ciężarowych*, Dom wydawniczy Bellona, Warszawa 1999.
3. Pszczółkowski J., *Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym*. WAT, Warszawa 2009.
4. Pszczółkowski J.: *Rozruch silnika spalinowego jako proces diagnostyczny*, Diagnostyka vol. 27, 2009.
5. Чижков Ю. П., *Сопротивление прокручиванию валов автомобильных двигателей при электростартерном пуске*. Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение, Но 10, 1971

Analysis of the starting signals of the internal combustion engine

This article discusses the signals recorded during the engine crankshaft driving by the electric starter and describes the effect of the temperature and power of the starter on the recorded signals. The test stand and methodology of the start-up testing of an internal combustion engine are presented. The sources of resistance moment in the internal combustion engine were mentioned and the factors influencing it were discussed, its components and dependencies allowing calculate it are pointed. It has been shown that the piston space tightness has a significant effect on the resistance of the internal combustion engine and hence on the value of the signals recorded during the crankshaft propulsion.

Autorzy:

mgr inż. **Grzegorz Dyga** - Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny: 00-908 Warszawa: ul. Gen. S. Kaliskiego 2. Tel 261 837 102, email: grzegorz.dyga@wat.edu.pl

dr hab. inż. **Józef Pszczółkowski**, prof. WAT - Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny: 00-908 Warszawa: ul. Gen. S. Kaliskiego 2. Tel 261 837 206, email: jozef.pszczolkowski@wat.edu.pl