

IMPROVEMENT SELECTED WORKING PARAMETERS OF THE ENGINE TURBOCHARGING WITH ROTATIONAL COMBUSTION CHAMBER SUPPLIED WITH THE RAPESEED FUEL BY THE CHANGE OF NOMINAL SETTING

Tomasz Stoeck

*The West Pomeranian University of Technology
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, Poland
tel.: +48 91 4494813, fax: +48 91 4494820
e-mail: tstoeck@wp.pl*

Abstract

An intensive expansion of motorization caused a necessity to limit its negative acting on the environment. It is connected with more and more law requirements from the range of protection of the natural environment. Directions of the introduced changes refer both to the sector of mass use of electric and thermal energy and the individual consumer who sees in a given problem most often in the aspect of liquid fuel consumption.

The essential part in this process is played by vegetable fuel like rape oil methyl group ester of higher fatty acids (RME), more and more often used to supply Diesel engines. At the same time, there is a problem of minimising unfavourable aspects of the operation of drive unit supplied with a fuel with different physicochemical properties when compared with diesel oil. In the paper is discussed an attempt to cope with these requirements by changing selected control settings of a engine turbocharging with rotational combustion chamber, treating rapeseed methyl esters as a self-contained fuel. The parameters adjusted in relation to the nominal settings were: injection pressure, the injection advance angle and injection pump volumetric fuel charge. The results of the tests have been shown in the form of the external characteristics of the engine tested.

Keywords: *combustion engine, rapeseed fuel, control parameters, exhaust gas smokiness*

POPRAWA WYBRANYCH PARAMETRÓW ROBOCZYCH SILNIKA TURBODOŁADOWANEGO Z WIROWĄ KOMORĄ SPALANIA ZASILANEGO PALIWEM RZEPAKOWYM PRZEZ ZMIANĘ NASTAW NOMINALNYCH

Streszczenie

Intensywny rozwój motoryzacji spowodował konieczność ograniczenia jej negatywnego działania na otoczenie. Związane jest to z coraz ostrzejszymi wymaganiami prawnymi z zakresu ochrony środowiska naturalnego. Kierunki wprowadzanych zmian dotyczą zarówno sektora masowego wykorzystania energii elektrycznej i cieplnej, jak również odbiorcy indywidualnego postrzegającego dany problem najczęściej w aspekcie zużycia paliw płynnych. Istotną rolę w tym procesie odgrywają paliwa roślinne takie jak ester metylowy wyższych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (RME), który coraz częściej stosuje się do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Jednocześnie pozostaje problem zmniejszenia niekorzystnych aspektów pracy jednostki napędowej zasilanej paliwem o odmiennych właściwościach fizykochemicznych w porównaniu z olejem napędowym. W referacie omówiono próbę sprostania tym wymaganiom przez zmianę wybranych nastaw regulacyjnych silnika turbodoładowanego z wirową komorą spalania, traktując ester metylowy oleju rzepakowego jako paliwo samodzielne. Parametrami regulowanymi w stosunku do ustawień nominalnych były: ciśnienie wtrysku, kąt wyprzedzenia wtrysku i objętościowa dawka paliwa pompy wtryskowej. Wyniki badań przedstawiono w formie charakterystyk zewnętrznych badanego silnika.

Słowa kluczowe: *silnik spalinowy, paliwo rzepakowe, parametry regulacyjne, zadymienie spalin*

1. Wstęp

Od wielu lat doładowanie turbosprężarkowe jest najchętniej wykorzystywanym sposobem zwiększenia mocy efektywnej i sprawności ogólnej silników pojazdów samochodowych. Pozwala

to na ograniczenie ilości typów produkowanych jednostek napędowych, gdyż dana konstrukcja w wersji wolnossącej i doładowanej obejmuje znacznie większy zakres mocy. Przy prawidłowym doborze turbosprężarki ciśnienie spalania, obciążenia mechaniczne i cieplne silnika rosną nieznacznie, dzięki czemu nie istnieje potrzeba wzmacniania jego najbardziej narażonych elementów. Należy mieć jednak na uwadze, iż zwiększanie mocy użytecznej w jednostkach z komorami dzielonymi jest ograniczona w stosunku do rozwiązań wtrysku bezpośredniego, na skutek gorszej jakości przepłukania powietrzem dostarczonym przez turbosprężarkę. Stanowi to bowiem warunek niezbędny do wymaganego schłodzenia tłoków i cylindrów, przy prawie całkowitym opróżnieniu gazów spalinowych przed nowym cyklem pracy. Nie zmienia to jednak faktu, że przez szereg lat produkcja silników tego typu była intensyfikowana, z uwagi na widoczną poprawę większości parametrów roboczych. W chwili obecnej ustąpiły one miejsca jednostkom z wtryskiem bezpośrednim, głównie ze względu na większe jednostkowe zużycie paliwa, mniejszą sprawność i konieczność spełnienia bardzo rygorystycznych norm z zakresu ochrony środowiska naturalnego. Tym niemniej ilość pojazdów wyposażonych w silniki z komorami dzielonymi (wirowymi) pozostaje w dalszym ciągu na tyle duża, że również dla nich warto poszukiwać korzystniejszych rozwiązań.

Jednym z preferowanych kierunków działań jest zasilanie silników o zapłonie samoczynnym paliwami roślinnymi lub ich mieszaninami z tradycyjnym olejem napędowym. Pozostaje to w zgodzie z postulatem o ograniczeniu ilości sadzy w spalinach wylotowych, który traktuje się jako najistotniejszy problem tych jednostek napędowych w aspekcie ekologicznym. Jednocześnie podkreśla się spadek parametrów dynamicznych samego silnika i zwiększenie zużycia paliwa, co wynika z odmiennych właściwości fizykochemicznych paliw pochodzenia roślinnego, w tym mniejszej wartości opałowej w odniesieniu do olejów ropopochodnych. W takim przypadku należałoby przeprowadzić zmianę nastaw fabrycznych jednostki napędowej, co nie wymusza stosowania innych rozwiązań i bezpośredniej ingerencji w jej budowę. Uwzględniając najistotniejsze wady silników z komorami wirowymi, proponowana regulacja powinna gwarantować jak najniższe zużycie paliwa w dalszej eksploatacji, przy utrzymaniu możliwie niewielkiego poziomu ilości emitowanej sadzy.

2. Metodyka pomiaru

Badania stanowiskowe prowadzono na silniku o zapłonie samoczynnym typu CY firmy Volkswagen, z wtryskiem pośrednim do komory wirowej Ricardo Comet Mark V. Był on wyposażony w turbosprężarkę „Garret” III generacji. Wykorzystano do tego celu typową hamownię silnikową, z hamulcem hydraulicznym HH-1, dynamometrem, kompletnym układem sterującym, tachometrem optyczno-stykowym DT-1236L, masową miernicą paliwa i dymomierzem absorpcyjnym MDO2. Stanowisko wchodzi w skład laboratorium silnikowego Katedry Eksploatacji Pojazdów Samochodowych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

W poszczególnych cyklach pomiarowych silnik zasilano estrem metylowym oleju rzepakowego (RME) i dla porównania tradycyjnym olejem napędowym (ON) [4]. Wartości nastaw zalecanych przez producenta (nominalnych) i całkowity zakres prowadzonej regulacji przedstawiono w Tab. 1. Badania wstępne pozwoliły wyodrębnić takie ustawienia aparatury wtryskowej, dla których parametry robocze silnika zasilanego paliwem roślinnym były najefektywniejsze lub przynajmniej zbliżone do tych, jakie uzyskano przy stosowaniu oleju napędowego. Uznano, że dla danej jednostki napędowej wynoszą one: ciśnienie wtrysku (p_{wtr}) = 15 MPa, kąt wyprzedzenia wtrysku (α_{ww}) = 19°OWK przed GMP tłoka i objętościowa dawka paliwa (Q_{pal}) = 15 mm³/cykl. Jednoczesna zmiana wszystkich trzech nastaw nie przyniosła wymiernych korzyści, głównie ze względu na zdecydowany wzrost zużycia paliwa i zwiększone zadymienie spalin. W związku z tym skoncentrowano się na wyborze jednej z nich, która wyraźnie wpłynie na poprawę przebiegu rozpatrywanych charakterystyk.

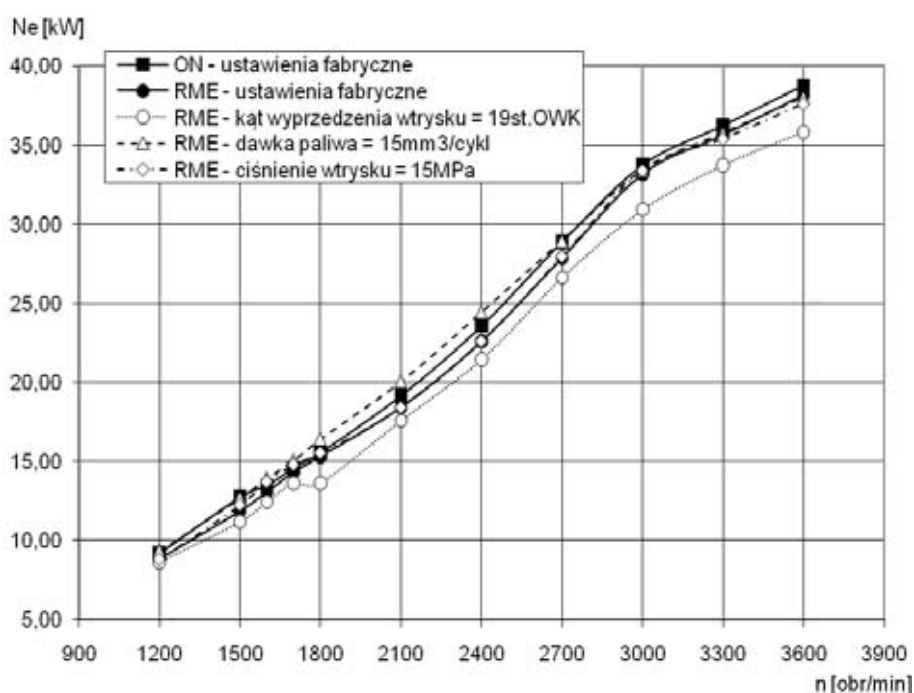
Tab. 1. Zmiana parametrów regulacyjnych aparatury wtryskowej silnika typu CY
 Tab. 1. Change of the CY engine injection system regulating parameters settings

Adjusted parameter	Nominal value (set)	Remaining setting values
Injection pressure - p_{wtr} [MPa]	16	13, 14, 15
Injection advance angle - α_{ww} [°OWK]	26	12, 19, 33, 40
Fuel charge - Q_{pal} [mm ³ /cycle]	12	9, 15, 18

3. Wyniki badań

Wyniki badań przedstawiono w formie graficznej, jako zbiorcze charakterystyki zewnętrzne następujących parametrów: mocy efektywnej (użytecznej) $N_e = f(n)$, momentu obrotowego $M_o = f(n)$, jednostkowego zużycia paliwa $g_e = f(n)$, współczynnika absorpcji promieniowania podczerwonego $k = f(n)$ i temperatury spalin $t_s = f(n)$.

Najniższe wartości mocy efektywnej uzyskano w sytuacji, gdy badany silnik zasilano estrem metylowym oleju rzepakowego, przy jednoczesnym zmniejszeniu kąta wyprzedzenia wtrysku na 19°OWK przed GMP (górnym martwym punktem) tłoka (Rys. 1). Największa różnica w porównaniu do kompletacji „RME - ustawienia fabryczne” nie przekroczyła jednak 7% i wystąpiła w rejonie najwyższych prędkości obrotowych. Przebieg pozostałych krzywych jest bardzo zbliżony, stąd trudno jednoznacznie wskazać na korzyści z prowadzonej regulacji. Należy jednak podkreślić, że mniejsza wartość opałowa paliwa roślinnego nie wpłynęła jednoznacznie negatywnie na charakterystyki zewnętrzne omawianego parametru pracy. Przy zwiększeniu dawki paliwa do 15 mm³/cykl zaobserwowano nawet niewielki wzrost mocy silnika w odniesieniu do zasilania olejem napędowym (1800-2400 min⁻¹), ale różnica ta była minimalna i mieściła się w granicach błędów pomiaru.

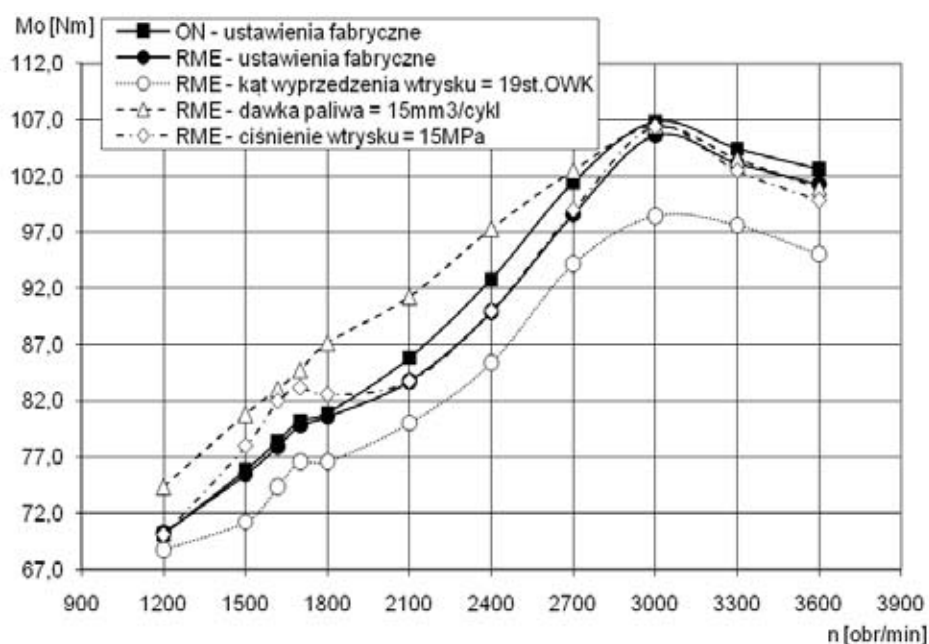


Rys. 1. Zbiorcza charakterystyka zewnętrzna mocy użytecznej silnika typu CY zasilanego ON i RME dla nastaw fabrycznych i optymalnych każdego z regulowanych parametrów

Fig. 1. External cumulative characteristic curve for the effective power of the CY-type engine supplied with ON and RME for factory (nominal) and optimum settings of each of the adjusted parameters

Bez względu na rodzaj stosowanego paliwa i sposób prowadzonej regulacji maksimum momentu obrotowego wystąpiło przy 3000 min⁻¹ (Rys. 2). Podobnie jak w przypadku mocy

najbardziej efektywna okazała się zmiana objętościowej dawki paliwa ($15 \text{ mm}^3/\text{cykl}$). W rejonie niskich i średnich prędkości obrotowych wartości momentu obrotowego były najwyższe, a dla pozostałego zakresu bardzo zbliżone do innych charakterystyk. Z drugiej strony patrząc zdecydowanie niekorzystną regulacją okazało się przestawienie kąta wyprzedzenia wtrysku w stosunku do ustawień zalecanych przez producenta. Jest to sytuacja w zasadzie odwrotna do silników z wtryskiem bezpośrednim, gdzie na skutek nieco krótszej zwłoki samozapłonu paliwa roślinnego w stosunku do oleju napędowego, sugeruje się właśnie zmniejszanie tej nastawy (późniejszy wtrysk). Dla takiego sposobu regulacji zdecydowanie lepsze rezultaty uzyskano w przypadku wersji wolnossącej badanego silnika, gdyż uzyskano blisko 5% wzrost momentu obrotowego w odniesieniu do ustawień nominalnych [5, 6].



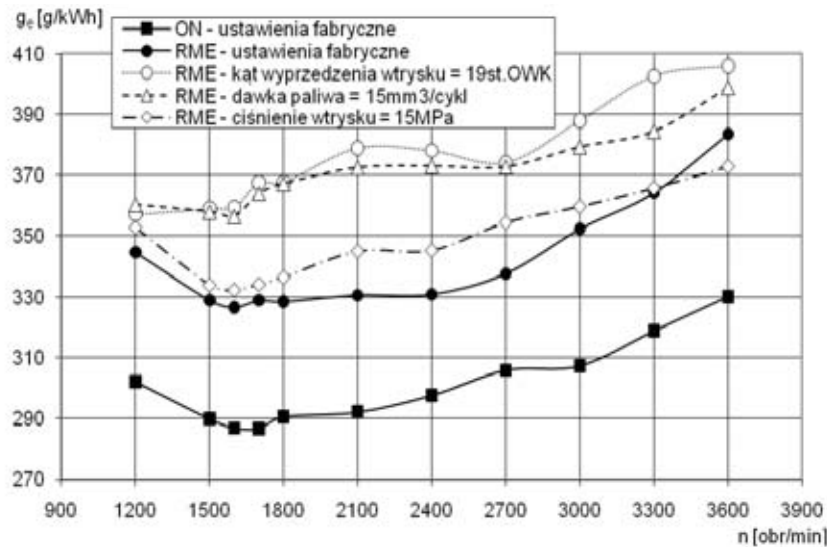
Rys. 2. Zbiorcza charakterystyka zewnętrzna momentu obrotowego silnika typu CY zasilanego ON i RME dla nastaw fabrycznych i optymalnych każdego z regulowanych parametrów

Fig. 2. External cumulative characteristic curve for the torque of the CY-type engine supplied with ON and RME for factory (nominal) and optimum settings of each of the adjusted parameters

Z analizy zbiorczej charakterystyki jednostkowego zużycia paliwa wynika jednoznacznie, iż każda z trzech proponowanych nastaw regulacyjnych wpłynęła negatywnie na wartości omawianego parametru roboczego (Rys. 3). Znacznie lepszym rozwiązaniem było pozostawienie ustawień fabrycznych zalecanych przez producenta. Ogólnie przyjmuje się, że wskaźnikiem ekonomiczności pracy silnika jest właśnie jednostkowe zużycie paliwa, informujące o ilości energii chemicznej zawartej w paliwie koniecznej do wyprodukowania jednostki mocy [3]. Tym samym przy niezmiennych nastawach nominalnych wzrost tego parametru pracy dla estru metylowego oleju rzepakowego, w porównaniu do zasilania jednostki olejem napędowym, kształtował się w granicach od 10 do 14%. Można to tłumaczyć niższą zawartością węgla i wodoru, co przekłada się na mniejszą wartość opałową paliwa roślinnego. Interesujące wyniki uzyskano dla ciśnienia wtrysku wynoszącego 15 MPa, gdyż dodatkowo parametry dynamiczne silnika były zbliżone lub niekiedy nawet lepsze jak dla innych sposobów regulacji. Pozostałe krzywe już znacząco obiegają od wartości uzyskiwanych dla paliwa ropopochodnego, gdyż różnice między nimi przekraczały nawet 20%. Należy jednak podkreślić, że zastosowanie turbosprężarki poprawiło sprawność obiegu silnika, więc jednostkowe zużycie paliwa było niższe w porównaniu z wersją bez doładowania.

Zdecydowanie najniższym poziomem zadymienia spalin, wyrażonym współczynnikiem absorpcji promieniowania podczerwonego, charakteryzowała się nastawa zmniejszająca kąt wyprzedzenia

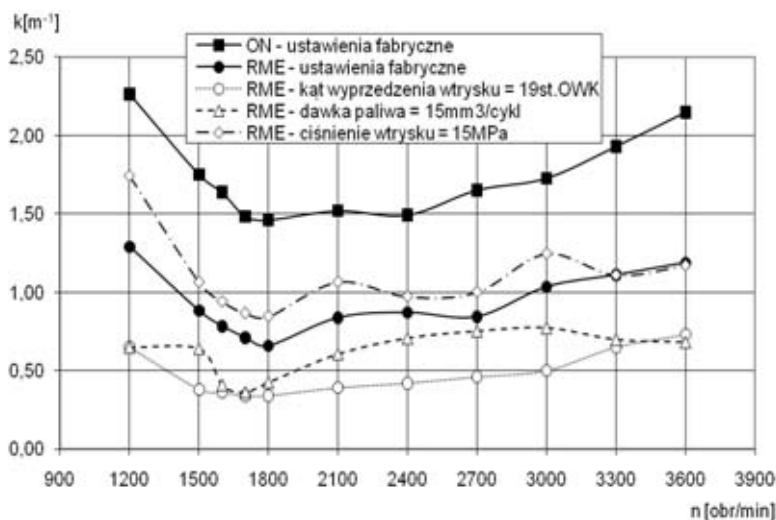
wtrysku na 19° OWK przed GMP tłoka. Wartości zawierały się bowiem w niewielkich granicach od $0,65$ do $0,74 \text{ m}^{-1}$. Zbliżony i zadawalający przebieg krzywej uzyskano również przy zwiększeniu



Rys. 3. Zbiorcza charakterystyka zewnętrzna jednostkowego zużycia paliwa silnika typu CY zasilanego ON i RME dla nastaw fabrycznych i optymalnych każdego z regulowanych parametrów

Fig. 3. External cumulative characteristic curve for the unitary fuel consumption of the CY-type engine supplied with ON and RME for factory (nominal) and optimum settings of each of the adjusted parameters

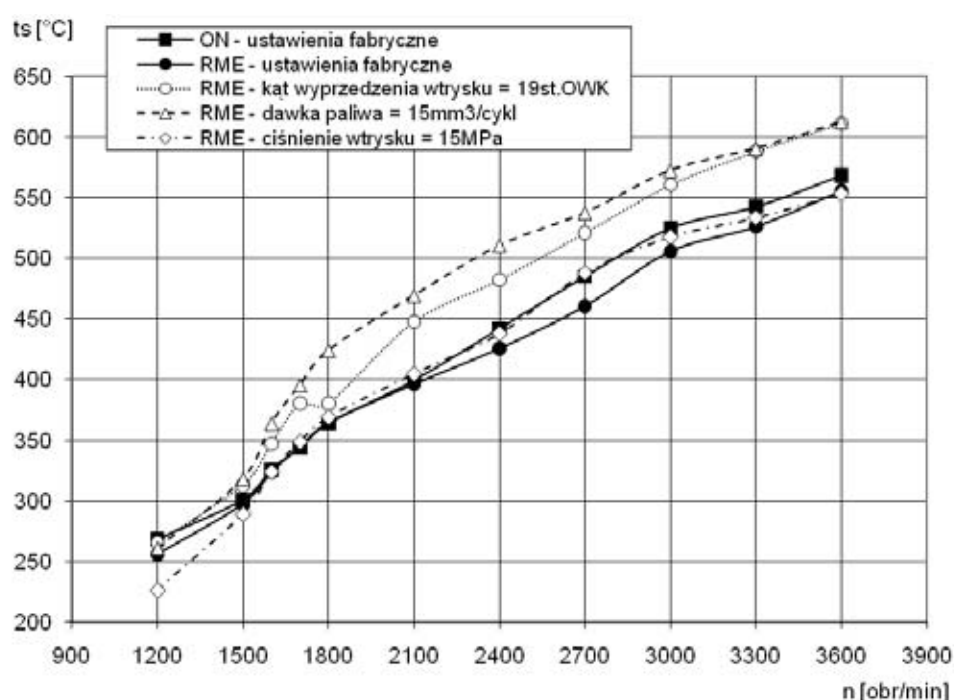
objętościowej dawki paliwa o $3 \text{ mm}^3/\text{cykl}$, w porównaniu z ustawieniem zalecanym przez producenta. Dla tak prowadzonych regulacji różnice w odniesieniu do zasilania silnika tradycyjnym olejem napędowym wyniosły od 52 do 73%, przy czym największe z nich odnotowano dla skrajnych prędkości obrotowych wału korbowego. Nie zmienia to jednak faktu, że czynnikiem mającym decydujący wpływ na rozpatrywany współczynnik absorpcji, był rodzaj stosowanego paliwa. Specyficzne właściwości fizykochemiczne estru metylowego oleju rzepakowego, czyli dodatkowe wiązania tlenowe w cząsteczkach i śladowa zawartość siarki sprawiają, że w aspekcie ekologicznym wypada ono zdecydowanie korzystniej niż paliwo ropopochodne. Warto również dodać, że spaliny wylotowe nie były badane na zawartość tlenków azotu (NO_x), których ilość w przypadku stosowania paliwa roślinnego zazwyczaj nieznacznie wzrasta [1, 7].



Rys. 4. Zbiorcza charakterystyka zewnętrzna zadymienia spalin silnika typu CY zasilanego ON i RME dla nastaw fabrycznych i optymalnych każdego z regulowanych parametrów

Fig. 4. External cumulative characteristic curve for the exhaust gases smokiness of the CY-type engine supplied with ON and RME for factory (nominal) and optimum settings of each of the adjusted parameters

Nieporządnym wzrost temperatury spalin badanego silnika uzyskano przy regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku i objętościowej dawki paliwa, w przypadku gdy był on zasilany paliwem roślinnym (Rys. 5). Najwyższe wartości tego parametru roboczego uzyskano w przedziale prędkości obrotowych 2100-2400 min^{-1} , a różnice w odniesieniu do ustawień nominalnych kształtowały się od 74 do 85°C (dla 19°OWK prze GMP tłoka). Determinuje to wyższe temperatury samego procesu spalania, co intensyfikuje proces odparowania paliwa roślinnego o podwyższonej lepkości i tym samym większych wymiarach kropli [2]. Z drugiej jednak strony wpływa niekorzystnie na wzrost obciążeń cieplnych jednostki turbodoładowanej, wpływając również negatywnie na trwałość elementów układu wydechowego. Warto również podkreślić, że podwyższona temperatura w komorze spalania stwarza bardzo dobre warunki do powstawania tlenków azotu, co jest dodatkowo ułatwione w przypadku stosowania paliwa rzepakowego i dostarczaniu większej ilości powietrza przy efekcie doładowania. W tym względzie korzystniej wypadło zmniejszenie ciśnienia wtrysku do 15 MPa, gdyż wartości temperatury spalin były porównywalne lub nawet niższe (przy 1200-1500 min^{-1}) w odniesieniu do ustawień producenta.



Rys. 5. Zbiorcza charakterystyka zewnętrzna temperatury spalin silnika typu CY zasilanego ON i RME dla nastaw fabrycznych i optymalnych każdego z regulowanych parametrów

Fig. 5. External cumulative characteristic curve for the temperature of exhaust gases of the CY-type engine supplied with ON and RME for factory (nominal) and optimum settings of each of the adjusted parameters

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy trudno jednoznacznie wskazać nastawę, która kompleksowo poprawiałaby przebiegi omawianych parametrów pracy. Pod względem dynamicznym najlepsze rezultaty uzyskano przy zwiększeniu dawki paliwa do 15 mm^3/cykl , gdyż uzyskano w ten sposób wzrost mocy efektywnej i momentu obrotowego, przy zadawalająco niskim poziomie zadymienia spalin. Niestety zaobserwowano również większe o blisko 20% jednostkowe zużycie paliwa w odniesieniu do oleju napędowego, które trudno byłoby zaakceptować ze względu na podwyższone koszty eksploatacyjne. W tym względzie korzystniej wypada regulacja ciśnienia wtrysku do 15 MPa, gdyż w aspekcie ekonomicznym uzyskano wartości porównywalne, a dla innych wskaźników pracy zbliżone lub nieznacznie lepsze od oleju ropopochodnego.

Z drugiej strony zmiana nastaw regulacyjnych przyniosła bardziej wymierne rezultaty w analogicznych badaniach, które prowadzono na tym samym stanowisku pomiarowym dla wersji

wolnossącej danego silnika [5, 6]. Warto jednak podkreślić, że zastosowanie doładowania turbosprężarką dla jednostki o identycznych cechach konstrukcyjnych, przyniosło zdecydowaną poprawę niemal wszystkich parametrów roboczych, również przy zasilaniu jej paliwem roślinnym. Jedynym wyjątkiem był wzrost poziomu zadymienia spalin, który można co prawda zmniejszyć przez jedną z przedstawionych sposobów regulacji, ale zawsze kosztem zwiększonego zużycia paliwa. Prawdopodobnie lepsze wyniki przyniosłoby dodatkowe chłodzenie powietrza doładującego, przy czym zastosowanie takiej modernizacji w silnikach starszych typów, wydaje się obecnie kłopotliwe i nieuzasadnione.

Literatura

- [1] Chłopek, Z., *Ochrona środowiska naturalnego*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, s. 53-57, Warszawa 2002.
- [2] Lotko, W., *Zasilanie silników spalinowych paliwami alternatywnymi*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Radomiu, s. 139-142, Radom 1995.
- [3] Mysłowski, J., *Doładowanie silników*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, s. 163-165, Warszawa 2002.
- [4] Stoeck, T., *Aspekt ekonomiczny i ekologiczny stosowania paliw rzepakowych do zasilania silnika z zapłonem samoczynnym*, Wydawnictwo Autobusy Sp. z o. o., Nr 1-2, s. 54-56, Radom 2006.
- [5] Stoeck, T., *Poprawa parametrów roboczych silników z wirową komorą spalania zasilanych paliwem roślinnym przez zmianę nastaw regulacyjnych*, Wydawnictwo Autobusy Sp. z o. o., Nr 3, s. 26-29, Radom 2009.
- [6] Stoeck, T., *Wpływ zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku na przebieg powierzchniowych charakterystyk zewnętrznych silnika z wirową komorą spalania w wersji wolnossącej i turbodoładowanej zasilanego RME*, Wydawnictwo: Autobusy Sp. z o. o., Nr 1-2, s. 24-26, Radom 1-2/2008.
- [7] Szlachta, Z., *Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, s. 116-130, Warszawa 2002.

