

УДК 629.3+ 62-6
UDC 629.3+ 62-6

BADANIA IDENTYFIKACYJNE SILNIKA SB 3.1 WYPOSAŻONEGO W UKŁAD RECYRKULACJI SPALIN

LEJDA Kazimierz, Prof. dr hab. Inż, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska
JAKUBOWSKI Mirosław, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska
BALAWENDER Krzysztof, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska
OCHAŁ Piotr, inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

ВИПРОБУВАННЯ ДВИГУНА SB 3.1 З РЕЦИРКУЛЯЦІЮ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

ЛЕЙДА Казімеж, Професор, Доктор габілітований, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща
ЯКУБОВСКИ Мирослав, Доктор інженер, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща
БАЛЯВЕНДЕР Кшиштоф, Доктор інженер, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща
ОХЕЛІ Пьотр, Інженер, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща

IDENTIFICATION RESEARCH TEST ENGINE SB 3.1 FITTED WITH EXHAUST GAS RECIRCULATION

LEJDA Kazimierz, Prof. DSc, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland
JAKUBOWSKI Mirosław, PhD., Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland
BALAWENDER Krzysztof, PhD., Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland
OCHAŁ Piotr, Ingeneer, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland

Wstęp. Układ recyrkulacji spalin jest układem, którym na celu ograniczenie emisji związków toksycznych do atmosfery. Głównym zadaniem tego układu, nazywanego w skrócie EGR (ExhaustGasRecirculation), jest obniżenie zawartości w spalinach tlenków azotu (NOx). Dzięki zastosowaniu połączenia układu wylotowego z układem dolotowym silnika możliwe jest wprowadzenie do układu dolotowego części spalin (recyrkulacja zewnętrzna). Możliwe jest także pozostawienie części spalin z poprzedniego cyklu roboczego silnika (recyrkulacja wewnętrzna). Powoduje to zmniejszenie ilości tlenu w przestrzeni nadłokowej i jednocześnie ogranicza ilość paliwa, która może zostać spalona. Dzięki temu zmniejsza się maksymalna temperatura obiegu, co pozwala na obniżenie emisji NOx. Działanie układu EGR ma również negatywne skutki, takie jak: mieszanie się spalin ze świeżym ładunkiem zwiększa strefę wygaszania płomienia na ściankach, co w konsekwencji wydłuża czas spalania a przez to zwiększa się emisja produktów niepełnego spalania (tlenek węgla, węglowodory i cząstki stałe). Skutkiem działania układu EGR jest także zwiększenie się temperatury na dolocie, co powoduje obniżenie sprawności teoretycznej oraz niewielki wzrost jednostkowego zużycia paliwa. Negatywne skutki działania układu EGR mogą być ograniczone, np. poprzez zastosowanie chłodzenia spalin powracających do procesu spalania [3].

Badania eksperymentalne przeprowadzono na jednocyndrowym silniku badawczym typu SB 3.1. Silnik SB 3.1 jest zmodyfikowaną wersją silnika wyprodukowanego przez dawny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Sprzętu Komunikacyjnego w Mielcu. Jest to jednocyndrowy silnik badawczy z zapłonem samoczynnym, który został w Katedrze Silników Spalinowych i Transportu wyposażony w zasobnikowy układ wtryskowy typu CommonRail, umożliwiający wtrysk pięciu dawek paliwa na cykl roboczy silnika przy różnych ciśnieniach wtrysku [1].

Dodatkowo, silnik został wyposażony w układ EGR oparty na zaworze elektromagnetycznym sterowanym elektronicznie APE. Zawór ten posiada wbudowany elektroniczny regulator ze sprzężeniem zwrotnym, co zapewnia jednoznaczne położenie zaworu w czasie pracy. Sygnał sterujący otwarciem zaworu jest przesyłany ze sterownika ECM przewodami zasilającymi układ elektroniczny zaworu. W KSSiT opracowano również sterownik z interfejsem graficznym, który pozwala na zadawanie wartości otwarcia zaworu (rys. 1). Zbudowany układ pozwala na ustawienia otwarcia zaworu w 12 położeniach, w tym jedno przy jego całkowitym zamknięciu. Sposób określenia otwarcia zaworu przedstawiono na rys. 3.

Badania zaworu EGR. Badania otwarcia zaworu EGR w zależności od sygnału sterującego przeprowadzono z użyciem głębokościomierza mikrometrycznego (rys. 2) do pomiaru wartości G_0 , a następnie wartości G (rys. 3). Wartość otwarcia zaworu U wyznaczono z następującej zależności:

$$U = G0 - G \quad (1)$$

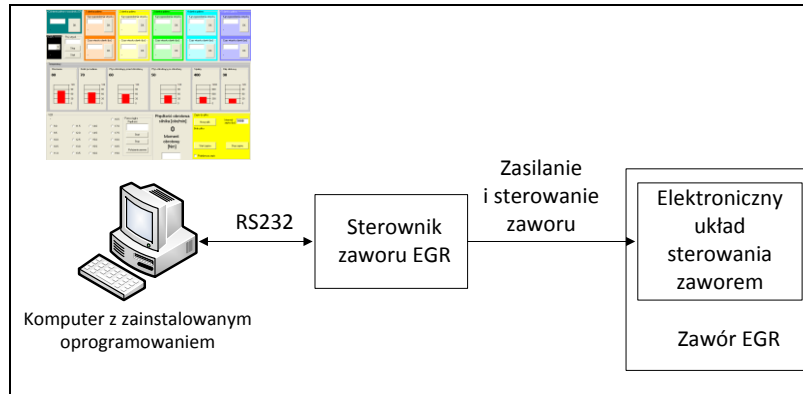
gdzie:

U – aktualne otwarcie zaworu [mm],

$G0$ – wskazanie głębokościomierza przy zamkniętym zaworze [mm],

G – wskazanie głębokościomierza przy aktualnym otwarciu zaworu [mm].

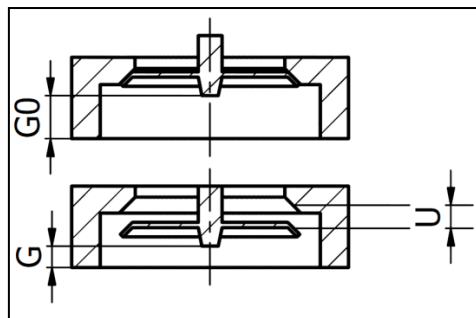
Taki sposób pomiaru wynika z trudności przeprowadzenia bezpośrednich pomiarów wartości U . Wyniki przeprowadzonych pomiarów zostały przedstawione na rys. 4.



Rys. 1. Sposób regulacji otwarcia zaworu EGR



Rys.2. Pomiar otwarcia zaworu EGR

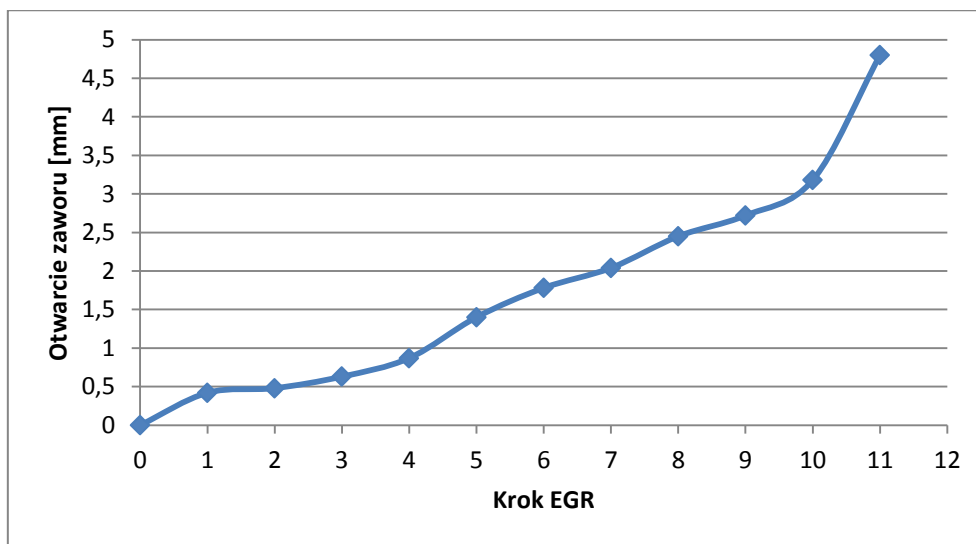


Rys. 3. Sposób wyznaczenia otwarcia zaworu EGR

Badania silnikowe. Przedmiotem badań był silnik o zapłonie samoczynnym SB3.1, do którego został zamontowany zewnętrzny układ recyrkulacji spalin bez chłodzenia. Jest to konstrukcja o pojemności 1850 cm³, jednocylindrowa, wykonująca 4 suwy na cykl pracy, chłodzona wodą. Zastosowano tutaj obiegowy system smarowania pod ciśnieniem. Pozostałe parametry zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry silnika SB3.1 [1]

Parametr	Wartość
Stopień sprężania	14,75
Skok tłoka	146 mm
Średnica tłoka	127 mm
Moc	23 kW
Maksymalny moment obrotowy	110 Nm
Obroty dla momentu max.	1600 obr/min
Obroty nominalne	2200 obr/min



Rys. 4. Zależność otwarcia zaworu EGR w zależności od zadanego kroku otwarcia zaworu

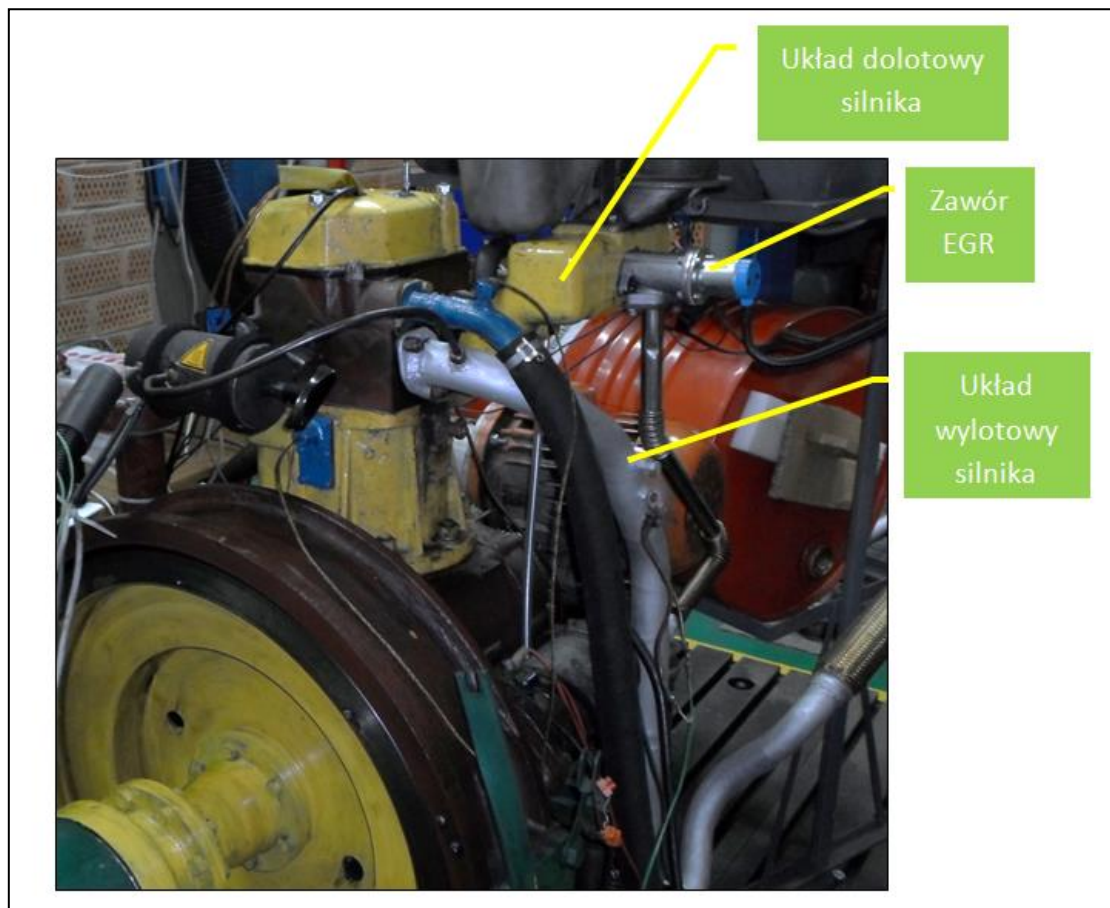
Jednostka badawcza została zmodyfikowana i wyposażona w układ wtryskowy typu Common-Rail. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwy jest wtrysk pięciu dawek paliwa na jeden cykl roboczy. Układ ten składa się z [1]:

- elektrycznej pompy niskociśnieniowej, której zadaniem jest doprowadzenie paliwa ze zbiornika (zastosowano tutaj pompę firmy BOSCH); zapewnia ona odpowiednie ciśnienie tłoczenia paliwa (ok. 0,5 MPa) oraz odpowiedni jego wydatek,
- filtra paliwa, którego zadaniem jest bardzo dokładne oczyszczanie paliwa, wyposażonego dodatkowo w zawór służący do regulacji ciśnienia w niskociśnieniowej części układu,
- przewodów niskiego i wysokiego ciśnienia,
- pompy wysokiego ciśnienia firmy BOSCH, która posiada 3 sekcje tłoczące mogące zapewnić ciśnienie do 120 MPa,
- wtryskiwacza elektromagnetycznego, dzięki któremu możliwy jest wtrysk paliwa pod ciśnieniem między 40 a 135 MPa (jego sterowanie odbywa się za pomocą sygnału elektrycznego),
- zasobnika paliwa, w którym został umieszczony czujnik ciśnienia paliwa,
- czujnika prędkości obrotowej,
- czujnika położenia wałka rozrządu,
- elektronicznego układu sterowania układem Common-Rail, dzięki któremu możliwy jest dobór ciśnienia wtrysku oraz czasu jego trwania.

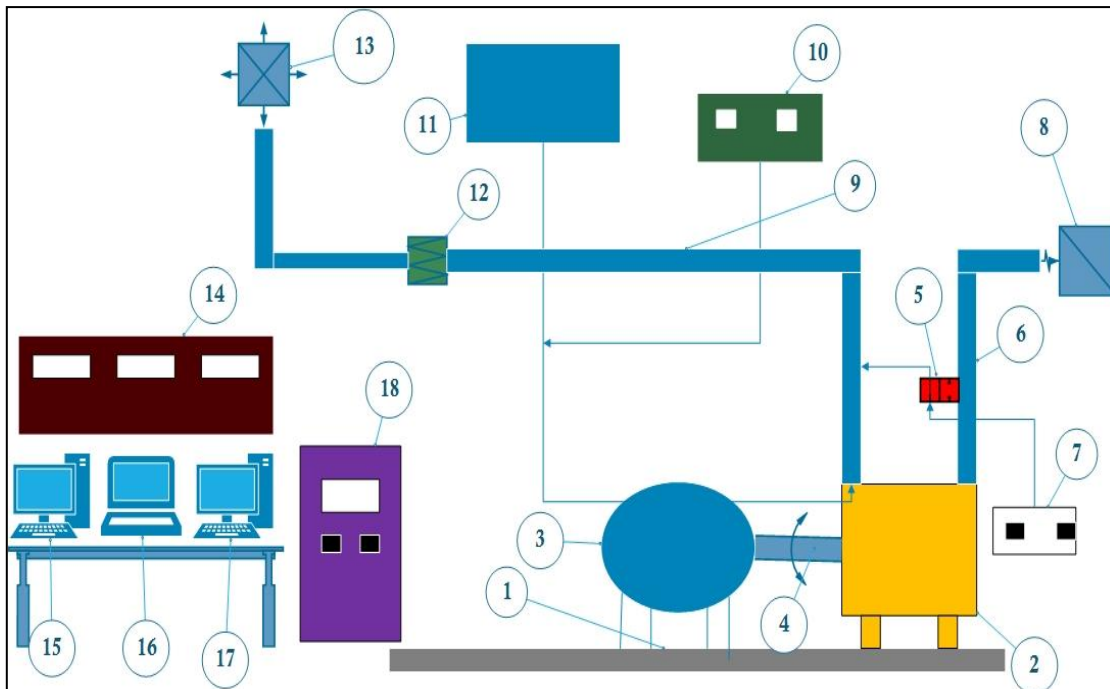
Widok stanowiska badawczego został przedstawiony na rys. 5, natomiast schemat z zaznaczeniem elementów wyposażenia na rys. 6.

Badany silnik znajduje się w boksie silnikowym Laboratorium Silników Spalinowych. Ze względu na drgania podczas jego pracy, wymagane jest specjalne mocowanie. Silnik zamocowany jest do płyty usytuowanej na tłumiku drgań do fundamentu budynku. Silnik jest obciążany przy pomocy hydraulicznego hamulca silnikowego D-630E, dzięki któremu możliwy jest pomiar prędkości obrotowej oraz momentu obrotowego. Hamulec jest mocowany w ten sam sposób, co badany silnik. Oprócz standardowych instalacji stanowiska hamownianego jest ono wyposażone w komputery i oprogramowanie umożliwiające sterowanie parametrami układu zasilania oraz dodatkowo urządzenia do pomiaru emisji substancji toksycznych w spalinach. Możliwe jest rejestrowanie parametrów, takich jak: temperatury silnika, temperatury powietrza dolotowego, temperatury spalin, średniego ciśnienia w zasobniku CR, temperatury paliwa. Możliwa jest także obserwacja przebiegów sygnałów szybkochylnych: przebiegu ciśnienia spalania, ciśnienia paliwa w zasobniku CR, chwilowego ciśnienia w przewodzie doprowadzającym paliwo do wtryskiwacza, sygnału sterującego wtryskiwaczem, sygnału z czujnika indukcyjnego określającego położenie wału korbowego [2].

Oprogramowanie do sterowania parametrami wtrysku paliwa pozwala na zmianę ciśnienia w zasobniku CR, zmianę ilości dawek wtryskiwanych w jednym cyklu roboczym silnika (max. 5) oraz regulację kąta wyprzedzenia i czasu trwania wtrysku każdej z części dawki.



Rys. 5. Silnik SB3.1 z układem recyrkulacji spalin



Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego: 1 - ława fundamentowa, 2 - badany silnik wraz z układem wtryskowym, 3 - hamulec silnikowy, 4 - wał z przegubami, 5 - zawór EGR, 6 - układ wylotowy spalin, 7 - sterownik zaworu EGR, 8 - wentylator wyciągowy, 9 - układ dolotowy, 10 - układ pomiaru zużycia paliwa, 11 - zbiornik paliwa, 12 - filtr powietrza, 13 - wentylator nadmuchowy, 14 - panel z zegarami pomiarowymi, 15 - komputer sterujący parametrami układu zasilania, 16 - komputer z oprogramowaniem sterującym zaworem EGR, 17 - komputer monitorujący parametry pracy silnika zmienne w czasie, 18 - analizator spalin do pomiaru emisji tlenków azotu w spalinach

Do pomiaru emisji tlenków azotu w spalinach użyto analizatora spalin firmy PIERBURG CID 2000. Działa on na zasadzie zjawiska chemiluminescencji. Dzięki niemu możliwe jest badanie emisji NO_x w zakresie od 0 do 10000 ppm z dokładnością ok. 0,1% wartości mierzonej. Dzięki elektronicznemu sterowaniu można analizator obsługiwać za pomocą specjalnego panelu, co daje możliwość kalibracji, zerowania i uśredniania pomiaru [4].

Badania i wyniki pomiarów silnikowych. Badania polegały na pomiarze następujących parametrów pracy silnika SB 3.1:

- temperatury spalin,
- godzinowego zużycia paliwa,
- siły na hamulcu,
- emisji tlenków azotu w spalinach,
- masowego przepływu powietrza.

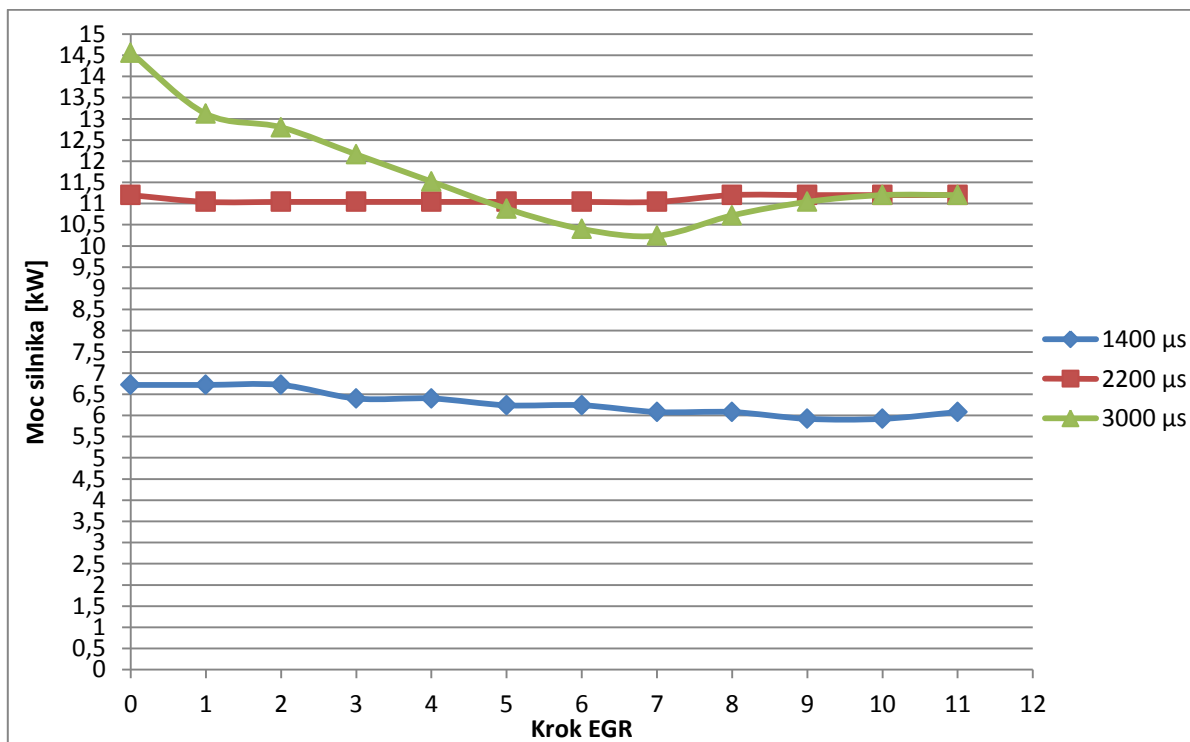
Wszystkie te parametry zostały zmierzone dla każdego kroku otwarcia zaworu recyrkulacji spalin, przy trzech różnych czasach wtrysku paliwa. Prędkość obrotowa została ustalona na stałym poziomie i wynosiła 1600 obr/min. Badania zostały przeprowadzone przy temperaturze otoczenia 8 °C i ciśnieniu otoczenia 752 mm Hg. Ciśnienie wtrysku, którego kąt wyprzedzenia wynosił 20 °OWK, zostało ustalone na poziomie 800 bar. Po każdym pomiarze parametrów następowało przełączenie na kolejny krok otwarcia zaworu recyrkulacji spalin. Otrzymane wartości mocy silnika i emisji tlenków azotu są wartościami średnimi jakie zmierzył analizator od momentu zadania kolejnego kroku do chwili ustalenia się wartości emisji na stałym poziomie. W czasie pracy silnika monitorowano również inne parametry, takie jak:

- przebieg ciśnienia w komorze spalania,
- przebieg ciśnienia w zasobniku CR,
- pulsacje powietrza w układzie dolotowym silnika,
- sygnał sterujący wtryskiwaczem.

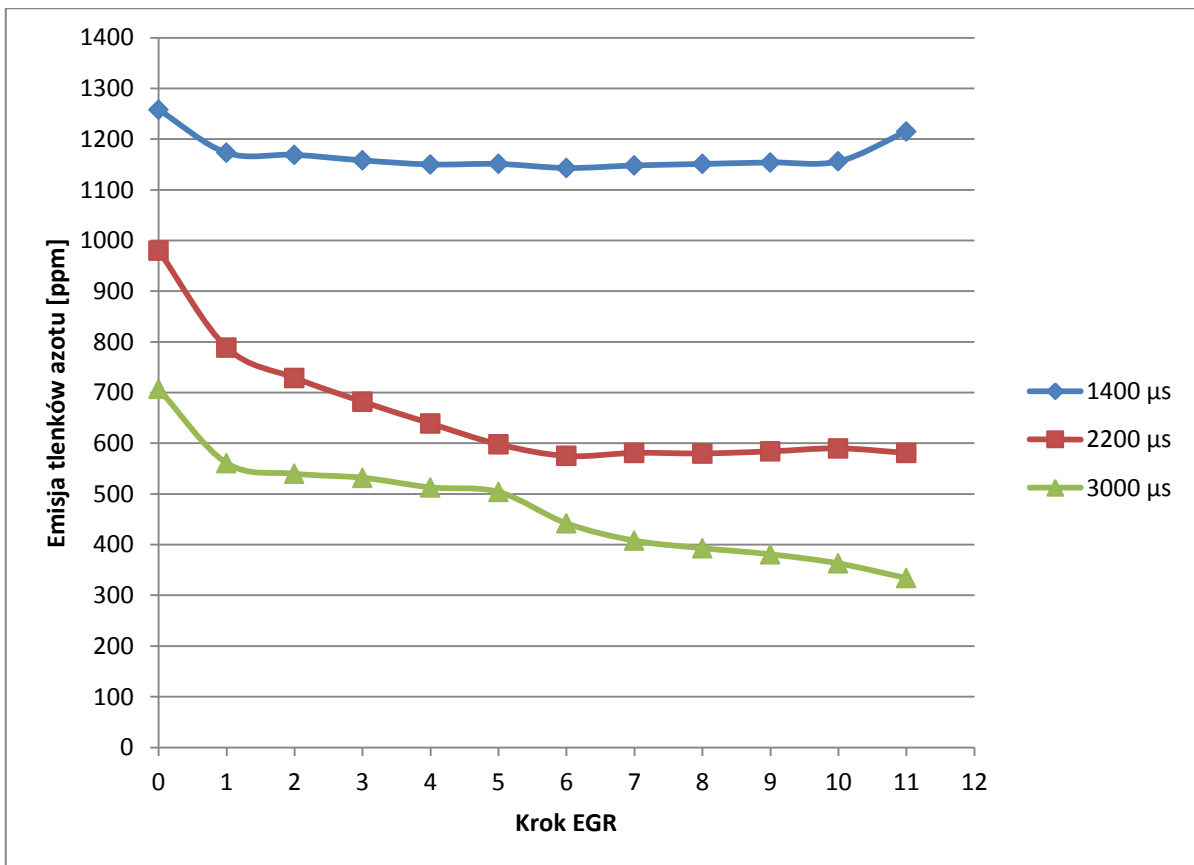
Parametry te pomogą w przyszłości na doskonalenie konstrukcji silnika SB 3.1 i na opracowanie planu bardziej zaawansowanych badań odnośnie wpływu układu recyrkulacji spalin na emisję innych składników toksycznych, w tym m.in.:

- tlenku węgla CO,
- węglowodorów HC,
- zadymienia spalin D,
- emisji masowej cząstek stałych PM.

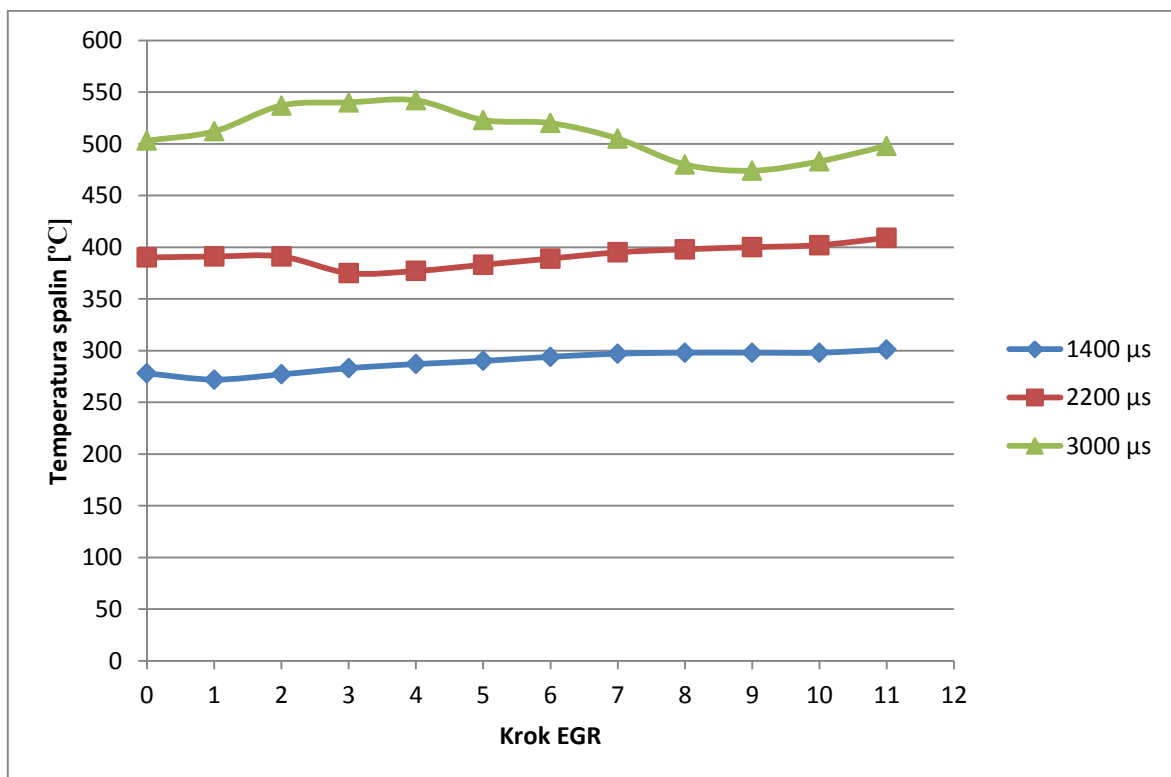
Na podstawie badań uzyskano wyniki, których ilustrację graficzną przedstawiono na rys. 7 - 10.



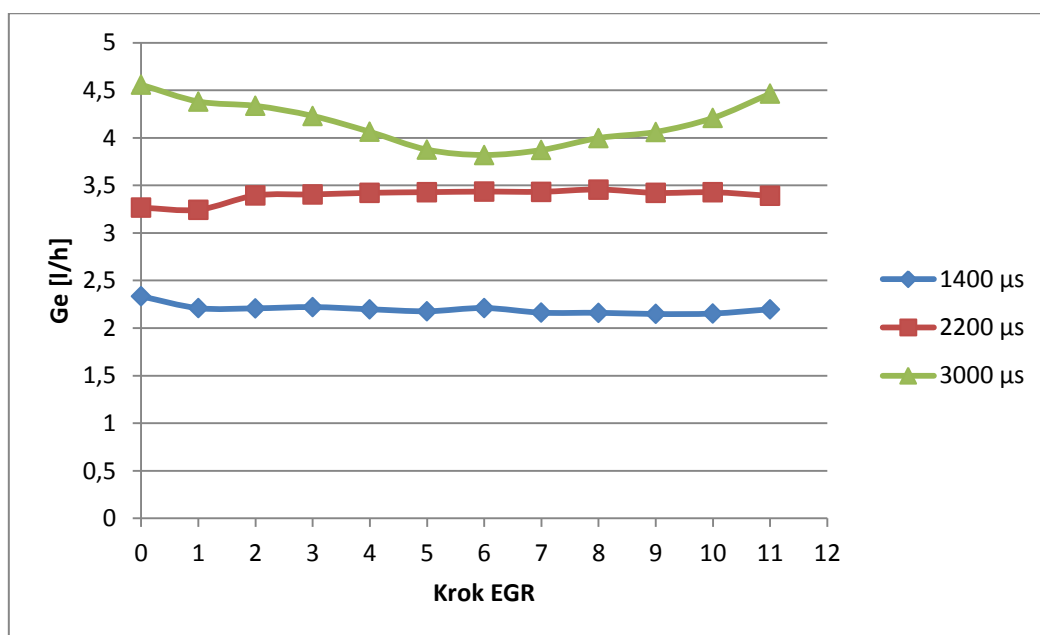
Rys. 7. Zależność między mocą silnika a stopniem otwarcia zaworu EGR dla różnych czasów wtrysku paliwa (1400, 2200, 3000 μs)



Rys.8. Emisja tlenków azotu w zależności od stopnia otwarcia zaworu EGR dla trzech różnych czasów wtrysku paliwa (1400, 2200, 3000 μs)



Rys. 9. Zależność temperatury spalin od stopnia otwarcia zaworu EGR dla różnych czasów wtrysku paliwa (1400, 2200, 3000 μs)



Rys. 10. Zależność godzinowego zużycia paliwa od stopnia otwarcia zaworu EGR

Wnioski. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono widoczny wpływ działania układu recyrkulacji spalin na pracę badanego silnika SB3.1. Przed rozpoczęciem badań oczywistym było założenie, że zmniejszy on emisję tlenków azotu, gdyż jest to główne zadanie tego systemu. Jednak po ich przeprowadzeniu można dokładniej przeanalizować, jak to zjawisko zachodziło w badanym silniku. Analizując rys. 8 można zaobserwować wyraźny spadek emisji NO_x wraz z każdym kolejnym krokiem otwarcia zaworu EGR. Spadek ten jest wyraźniejszy, im większe jest obciążenie silnika czyli dłuższy czas wtrysku. We wszystkich trzech przypadkach największy spadek można zaobserwować pomiędzy zamkniętym zaworem a pierwszym krokiem jego otwarcia. Dla pierwszego czasu wtrysku, który wynosił 1400 µs, po wyraźnym spadku dla pierwszego kroku można zaobserwować, że przebieg emisji NO_x kształtuje się mniej więcej na stałym poziomie. W przypadku czasu wtrysku 2200 µs widać ciągły spadek emisji tlenków azotu, który stabilizuje się od 6 kroku otwarcia zaworu EGR, z tendencją wzrostu dla ostatnich kroków. Najbardziej wyraźny spadek emisji NO_x w spalinach badanego silnika można zauważyć dla czasu wtrysku 3000 µs, który jest ciągły dla wszystkich kroków otwarcia zaworu.

Podobnie sytuacja wygląda odnośnie wpływu układu recyrkulacji spalin na moc osiąganą przez silnik. W tym wypadku wpływ otwarcia zaworu dla dwóch pierwszych czasów wtrysku, tj. 1400 µs i 2200 µs, jest bardzo nieznaczny. Należy jednak zauważyć, że w obydwu przypadkach moc nieznacznie spada na początku i wzrasta dla ostatnich wartości otwarcia zaworu EGR. W przypadku najdłuższego czasu wtrysku spadek mocy jest dużo bardziej wyraźny, mimo iż dla ostatnich wartości otwarcia zaworu moc nieco wzrasta, to jej wartość jest znacznie mniejsza niż w przypadku zaworu zamkniętego.

Reasumując, układ recyrkulacji spalin zamontowany w silniku badawczym SB 3.1 spełnił swoją rolę. Występuje obniżenie emisji NO_x. Niestety, występuje także spadek mocy silnika. Dlatego też wskazany byłby montaż układu chłodzącego recyrkulowane spaliny. Nie były także optymalizowane parametry regulacyjne silnika. W związku z tym konieczne jest prowadzenie dalszych prac nad rozwojem konstrukcji i możliwości badawczych silnika oraz realizacją eksperymentów w znacznie szerszym zakresie, szczególnie dotyczącym optymalizacji parametrów wtrysku paliwa oraz pomiaru innych składników toksycznych spalin.

LITERATURA

- [1] Baławender K.: Wpływ wybranych parametrów regulacyjnych procesu wtrysku na emisję cząstek stałych w silniku wysokoprężnym typu DI. Rozprawa doktorska, Rzeszów 2007.
- [2] Kuszewski H.: Ustrzycki A.: Laboratorium spalinowych napędów środków transportu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
- [3] Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Tom 2. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [4] Woś P.: Analiza wpływu charakterystyki paliwa w silniku wysokoprężnym z komorą niedzielną na emisję tlenków azotu NO_x. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2003.

STRESZCZENIE

LEJDA Kazimierz. Badania identyfikacyjne silnika sb 3.1 wyposażonego w układ recyrkulacji spalin / LEJDA Kazimierz, BALAWENDER Krzysztof, JAKUBOWSKI Mirosław, OCHAŁ Piotr // Wisnyk Narodowego Uniwersytetu Transportu. –K. : NUT, 2015. - № 32.

Wartykule przedstawiono wstępne badania silnika SB 3.1 po wyposażeniu go w układ EGR z zaworem elektromagnetycznym sterowanym elektronicznie.

РЕФЕРАТ

ЛЕЙДА Казімеж. Випробування двигуна SB 3.1 з рециркуляцією відпрацьованих газів / ЛЕЙДА Казімеж, БАЛЯВЕНДЕР Кшиштоф, ЯКУБОВСКИ Мирослав, ОХЕЛ Пьотр // Вісник Національного транспортного університету. Серія “Технічні науки”. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2015. - Вип. 2 (32).

У статті наведено попереднє дослідження двигуна SB 3.1 з електромагнітним клапаном EGR та електронним управлінням.

ABSTRACT

LEJDA Kazimierz, BALAWENDER Krzysztof, JAKUBOWSKI Mirosław, OCHAŁ Piotr. Identification research test engine sb 3.1 fitted with exhaust gas recirculation. Visnyk National Transport University. Series “Technical sciences”. Scientific and Technical Collection. - Kyiv. National Transport University, 2015. - Issue 2 (32).

The article presents a preliminary study on the SB 3.1 engine equipped with the EGR solenoid valve electronically controlled.

AUTORZY:

LEJDA Kazimierz, Prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszów, Polska

BALAWENDER Krzysztof, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszów, Polska

JAKUBOWSKI Mirosław, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszów, Polska

OCHAŁ Piotr, inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszów, Polska

АВТОРИ:

ЛЕЙДА Казімеж, Професор, Доктор габлітований, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Жешув, Польща

БАЛАВЕНДЕР Кшиштоф, Доктор інженер, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Жешув, Польща

ЯКУБОВСКИ Мирослав, Доктор інженер, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Жешув, Польща

ОХЕЛ Пьотр, Інженер, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згоряння і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Жешув, Польща

AUTHORS:

LEJDA Kazimierz, Prof. DSc, Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

BALAWENDER Krzysztof, PhD., Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

JAKUBOWSKI Mirosław, PhD., Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

OCHAŁ Piotr, Engineer, Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Корпач А.О., кандидат технічних наук, Національний Транспортний Університет, професор кафедри двигунів і теплотехніки, Київ, Україна.

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний Транспортний Університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Korpach A.O., Ph.D., National Transport University, Professor of Department of Engines and Heating Engineering, Kyiv, Ukraine.

Sakhno V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of Department of Automobile, Kyiv, Ukraine.