

Dariusz PIETRAS*
Maciej SOBIESZCZAŃSKI**

Problemy regulacji silnika o zapłonie iskrowym z recyrkulacją spalin

W artykule przedstawiono wyniki badań silnika o zapłonie iskrowym przeprowadzone w celu określenia wpływu recyrkulacji spalin na jego osiągi i zawartość toksycznych składników w spalinach. Badania prowadzono w zakresie natężenia recyrkulacji, w którym negatywne oddziaływanie tego procesu na osiągi silnika można było wyeliminować poprzez odpowiedni dobór kąta wyprzedzenia zapłonu. W dalszej części omówiono badania silnika związane z odpowiednim oprogramowaniem mikroprocesora ECM algorytmami sterującymi procesem recyrkulacji. W końcowej części artykułu przedstawiono badania testowe według regulaminów EURO II i EURO III, przeprowadzone na samochodzie z silnikiem sterowanym według tego oprogramowania.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie iskrowym, recyrkulacja spalin, sterowanie, emisja

Issues related to adjustment of a spark ignition engine with exhaust gas recirculation

The article presents results of a spark ignition engine examination, which has been conducted to establish the influence of exhaust gases recirculation on the engine performance and the toxic content in exhaust gases. The research concentrated on identifying a range of recirculation levels, which enabled to eliminate its negative influence on the engine performance by means of selecting an appropriate angle of advance. Further, the article discusses the engine examination procedures involving different recirculation control algorithms in the ECM chip. Finally, the article presents EURO II and EURO III tests, conducted on a vehicle/engine controlled by the above-mentioned software.

Key words: S.I. engine, exhaust gas recirculation, engine control, emission

1. Wstęp

Podstawowym celem stosowania recyrkulacji spalin w silnikach tłokowych jest obniżenie zawartości wysokotoksycznych tlenków azotów w spalinach tych silników. Polega ona na doprowadzaniu pewnej ilości spalin wylotowych do świeżego ładunku zasysanego do cylindra w czasie suwu dolotu.

W historii stosowania procesu recyrkulacji w silnikach o zapłonie iskrowym można wyróżnić dwa okresy. Pierwszy ma początki w latach 70-80 ubiegłego stulecia w Stanach Zjednoczonych, gdzie w wyniku prawnych nacisków związanych z ochroną środowiska, w silnikach zasilanych gaźnikiem, zastosowano dwufunkcyjne reaktory katalityczne obniżające w spalinach zawartość węglowodorów i tlenków węgla. Natomiast w celu redukcji zawartych w nich tlenków azotu niezbędnym okazało się wykorzystanie recyrkulacji spalin. Okazało się jednak, że w ówczesnych warunkach mechanicznej regulacji tych silników recyrkulacja powodowała pogorszenie ich osiągnięć, objawiające się wzrostem jednostkowego zużycia paliwa. Wprowadzenie, w końcu lat 80-tych, elektronicznie sterowanego wtrysku paliwa lekkiego, umożliwiło zasilanie silników o zapłonie iskrowym stechiometrycznymi mieszaninami paliwowo-powietrznymi, a tym samym stworzyło warunki do opracowania katalizatora trójfunkcyjnego, redukującego w spalinach również tlenki azotu. Wprowadzenie katalizatorów trójfunkcyjnych spowodowało zaniechanie stosowania w silnikach, szczególnie małych popularnych samochodów, procesu recyrkulacji spalin. Dopiero w drugiej połowie lat 90-tych, w związku z kolejnym zaostrzeniem przepisów ograniczających toksyczność spalin samo-

1. Introduction

The principal reason for introducing exhaust gases recirculation technology in piston engines is the reduction of the emission of an extremely toxic nitric oxide. Its principle is to mix fresh fuel-air mixture, sucked into the cylinder during an intake stroke, with a certain amount of exhaust gases.

Two periods can be distinguished in the history of EGR in spark ignition engines. The first period falls to the seventies and eighties of the past century in the U.S., where legal pressure related to the preservation of environment led to introducing two-phase catalytic converters in carburetor engines to lower hydrocarbon and carbon oxide levels in exhaust gases. While lowering nitric oxide levels required introducing EGR. Nevertheless, in manually adjusted engines, as they were at that time, recirculation impaired their performance, which resulted in greater elementary fuel consumption. Late 1980s brought an electronically controlled light fuel injection, which enabled to fuel spark ignition engines with stoichiometric fuel-air mixtures, leading to the development of a three-phase catalytic converter, which also reduced nitric oxide levels. As the three-phase catalytic converters were introduced, EGR technology was given up, especially in small popular cars. Not before the middle of the nineties did the technology experience its revival, this time, electronics optimized for engine performance, due to an introduction of even stricter regulations to limit exhaust gases toxicity (EURO II i EURO III). It appeared that any means implemented to lower carbon oxide and hydrocarbons levels in exhaust gases, such as combustion of stratified or lean mixtures and perfection of blaster chambers in order to elim-

chodów (EURO II i EURO III), ponownie powrócono do wykorzystywania recyrkulacji spalin, tym razem jednak sterowanej elektronicznie i optymalizowanej z punktu widzenia innych osiągnięć silnika. Okazało się bowiem, że zabiegi umożliwiające dalsze zmniejszenie zawartości w spalinach tlenku węgla i węglowodorów, polegające na spalaniu uwarstwionych i ubogich mieszanin oraz udoskonalaniu kształtów przestrzeni spalania poprzez eliminację tak zwanych „przestrzeni szkodliwych”, nie miały istotnego wpływu na zawartość tlenków azotu. Ponadto w recyrkulacji spalin dostrzeżono pewne inne możliwości poprawy procesu roboczego silnika, polegające na możliwości zmniejszenia przy małych obciążeniach strat pompowania oraz kompensacji w tych warunkach termodynamicznego stopnia sprężania.

Mechanizm oddziaływania recyrkulacji spalin na proces cieplny przebiegający w cylindrze silnika jest bardzo złożony i dotychczas ostatecznie niewyjaśniony, stąd też podstawę wykorzystania recyrkulacji do redukcji tlenków azotu stanowią badania eksperymentalne. Jest rzeczą znaną i oczywistą, że recyrkulacja spalin powoduje zmniejszenie koncentracji tlenu w ładunku roboczym, zwiększenie jego pojemności cieplnej oraz zwiększenie aktywnych chemicznie rodników w okresie zapłonu. Oznacza to między innymi, że ilość ciepła wydzielonego w czasie spalania i przypadającego na jednostkę masy ładunku roboczego jest mniejsza w warunkach recyrkulacji i powoduje niższe temperatury procesu spalania. W konsekwencji tlenki azotu, które są produktem asocjacji zdysocjowanych wcześniej cząstek tlenu i azotu, mają mniej korzystne warunki powstawania. Z drugiej strony proces spalania ładunku o mniejszej koncentracji tlenu przebiega wolniej i z większym opóźnieniem powodując zmianę jego efektów termodynamicznych i pogorszenie osiągnięć silnika takich jak średnie ciśnienie użyteczne i sprawność. Może również bezpośrednio lub pośrednio oddziaływać na zawartość w spalinach tlenku węgla i węglowodorów.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań silnika o zapłonie iskrowym dotyczące wpływu recyrkulacji spalin na jego osiągi oraz regulacji tego silnika niwelującej negatywne skutki uboczne tej recyrkulacji.

2. Cel, zakres i obiekt badań

Badania doświadczalne omówione w niniejszym artykule zostały poprzedzone analizami symulacyjno-numerycznymi procesów spalania w warunkach recyrkulacji spalin [1], [2]. Wynikiem tych analiz było sprecyzowanie tezy i celu badawczego, które można sformułować następująco: „Jeżeli, w procesie spalania z recyrkulacją spalin, wraz z powiększeniem wartości kąta wyprzedzenia zapłonu można uzyskać przyrosty wartości sprawności cieplnej i średniego ciśnienia indykowanego, większe niż zmniejszenie tych wartości spowodowane wydłużeniem procesu spalania w obecności recyrkulowanych spalin, to istnieje możliwość dobrania takich kątów spalania, przy których można osiągnąć niezmienny poziom wartości powyższych parametrów przy jednoczesnym zmniejszeniu zawartości tlenków azotu w spalinach”. Zatem praktycznym celem omawianych badań było określenie warunków regulacji silnika (stopnia recyrku-

inate “risky spaces”, had no significant impact on nitric oxide levels. Apart from that, gas recirculation promised other opportunities to improve the engine’s working process, by means of reducing losses in pumping at small loads, and compensate the compression ratio (in these conditions).

As the mechanism of EGR influence on thermal processes in the cylinder is very complex and not entirely discovered, the use of recirculation to reduce nitric oxide levels relies on experimental examinations. It’s a well-known and obvious fact, that exhaust gases recirculation lowers oxygen concentration in fuel-air mixture, increases the mixture’s thermal capacity and increases the amount of chemically active free radicals at combustion. Among other things, it implies that with recirculation the amount of heat released at combustion in relation to a workload unit is smaller, similarly to lower combustion temperatures. Thus, the conditions are less favorable for nitric oxides to develop through association of pre-dissociated particles of oxygen and nitrogen. On the other hand, lower oxygen concentration means that the combustion process runs slower and with greater delay, which influences its thermodynamic effect and impairs the engine performance, such as mean effective pressure and efficiency. It may also influence carbon monoxide and hydrocarbon levels in exhaust gases, either directly or indirectly.

This article presents results of a spark ignition engine examination, as regards the influence of exhaust gases recirculation on engine performance and adjustments necessary to remove negative effects of recirculation.

2. Purpose, scope and object of research

Examinations discussed herein have been preceded by analyzing numerical simulations of the combustion process under conditions of exhaust gases recirculation [1], [2]. These analyses permitted to determine a thesis and purpose of the research, which may be expressed as follows: “If it is possible to achieve in the process of fuel combustion with exhaust gases recirculation, through increasing the angle of advance, increases in thermal efficiency and indicated mean effective pressure higher than their decrease due to longer combustion times in the presence of recirculated exhaust gases, then it is possible to identify advance angles which make it possible to attain unchanged levels of these parameters while lowering nitric oxide levels in exhaust gases”. Therefore, a practical purpose of examinations discussed herein is to identify engine settings (i.e. exhaust gases recirculation ratio and the angle of advance), which result in lower carbon nitric oxide levels in exhaust gases before the catalytic converter, while maintaining engine overall efficiency and power output at unchanged levels.

A small car engine has been chosen as the object of examination, four-stroke type with electronic ignition and MPI fuel injection control, single cylinder’s displacement of 350 ccm and maximum engine speed of 5200 rpm.

Any tests discussed herein have been classified as preliminary, implication and revision examinations. Preliminary examinations included: measurement the combustion process parameters, engine performance and the content of tox-

lacji spalin i kąta wyprzedzenia zapłonu), dla których uzyskuje się zmniejszenie zawartości tlenków azotu w spalinach przed katalizatorem, przy jednoczesnym zachowaniu na niezmiennym poziomie sprawności ogólnej i mocy silnika.

Obiektem badań był silnik małego samochodu osobowego, czterosuwowy z elektronicznym sterowaniem zapłonu i wtrysku paliwa w systemie MPI, o pojemności skokowej jednego cylindra 350 cm³ i maksymalnej prędkości obrotowej 5200 obr/min.

Omówione badania podzielono na podstawowe, implikacyjne i weryfikacyjne. Badania podstawowe obejmowały pomiary parametrów procesu spalania, osiągow silnika oraz zawartości toksycznych składników w spalinach w ustalonych warunkach pracy, przy różnych obciążeniach, różnych prędkościach obrotowych i różnych stopniach recyrkulacji EGR¹⁾. Zakres badanych stopni recyrkulacji spalin, na podstawie badań wstępnych, został ograniczony do wartości umożliwiających utrzymanie stałej sprawności ogólnej i średniego ciśnienia użytecznego, uzyskiwanych poprzez odpowiednią korektę kąta wyprzedzenia zapłonu. Badania implikacyjne miały na celu przeniesienie wyników badań podstawowych, w postaci algorytmów sterujących recyrkulacją spalin i kątem wyprzedzenia zapłonu do systemu sterowania silnikiem przygotowanym do zabudowy w samochodzie. Z kolei badania weryfikacyjne stanowiły próbę potwierdzenia skuteczności oddziaływania recyrkulacji spalin na parametry pracy silnika z punktu widzenia testów toksyczności EURO II i EURO III.

3. Badania wpływu recyrkulacji spalin na parametry pracy silnika przy standardowej regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów dla stałej prędkości obrotowej silnika $n = 2800$ obr/min, obciążeniu $OBC = 50\%$, przy kątach wyprzedzenia zapłonu odpowiadających standardowej regulacji silnika bez recyrkulacji spalin, wykonane dla trzech stopni recyrkulacji ($EGR = 0\%$, $4,6\%$ i $7,4\%$). Podobny charakter zmian przedstawionych na wykresie parametrów występował dla pozostałych, badanych punktów pracy silnika.

Z przedstawionych danych doświadczalnych wynika, że recyrkulacja spalin istotnie wpływa na proces spalania wydłużając okres zwłoki zapłonu i czas jego trwania. Skutkiem tego oddziaływania jest znaczne zmniejszenie sprawności ogólnej silnika η_o i średniego ciśnienia użytecznego p_e oraz zmniejszenie maksymalnego ciśnienia spalania p_{max} występującego w komorze spalania. Wpływ recyrkulacji na zawartość w spalinach węglowodorów HC i tlenku węgla CO jest niewielki, natomiast w badanym zakresie recyrkulacji bardzo istotnie, bo przeszło dziesięciokrotnie, zmniejsza zawartość tlenków azotu NO_x w spalinach.

Z kolei na rysunku 2 porównano sprawności i toksyczność spalin silnika przy $EGR = 0$ i $EGR = 7,5\%$ w dziewięciu punktach jego pracy odpowiadających prędkościom obro-

ins in exhaust gases under stabilized working conditions, with different loads, different engine speeds and EGR ratios¹⁾. Based on preliminary examination results, a scope of examined EGR ratios has been limited to values, which facilitate maintaining constant overall efficiency and mean effective pressure, by means of appropriate adjustments in the angle of advance. Implication examinations concentrated on transferring the results of preliminary examinations, i.e. algorithms, which control the exhaust gases recirculation ratio and the angle of advance, to an engine control unit (ECU), ready to be installed in a car. Consequently, verification examinations attempted to confirm the effectiveness of EGR 's influence on the engine's working parameters in the context of EURO II and EURO III toxicity tests.

3. Testing EGR's influence on the engine's working parameters. Standard advance angle setting

Fig. 1 presents measurement results at constant engine speed $n = 2800$ rpm, load $OBC = 50\%$, and angles of advance corresponding to standard (no EGR) engine setting, taken for three different recirculation ratios ($EGR = 0\%$, 4.6% and 7.4%). Other aspects of engine functioning experienced changes similar in nature to those presented in the parameters' diagram.

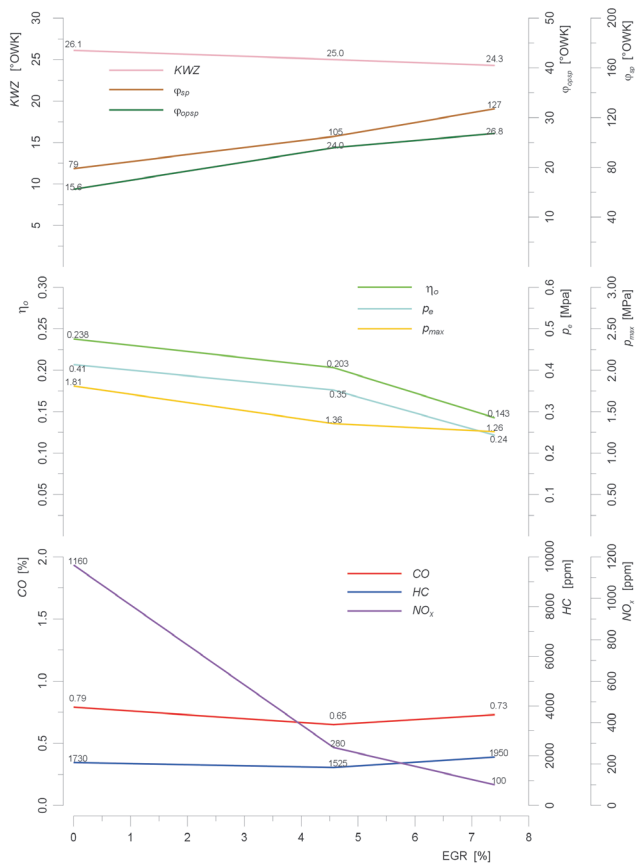
Presented data prove that exhaust gases recirculation has considerable impact on the combustion process by prolonging the ignition delay and its duration. Such influence results in significant reduction in the engine overall efficiency η_o , mean effective pressure p_e and peak fire pressure p_{max} of the combustion chamber. EGR influence on HC and CO content in exhaust gases is insignificant. However, in each of the examined ranges of recirculation a significant ten-fold decrease occurred in nitric oxide NO_x levels in exhaust gases.

Consequently, Fig. 2 compares efficiencies and toxicities for $EGR = 0$ and $EGR = 7.5\%$ at nine points of the engines operation, which correspond to engine speeds of $n = 1600$; 2800 and 4000 rpm and engine loads of $OBC = 25$, 50 , 75% with a standard KWZ²⁾ setting. Diagrams reveal a decrease of the engine's overall capacity at $EGR = 7.5\%$, which reaches even 45 to 48% at lower engine loads and lower/moderate engine speeds. The decrease is a little less at higher engine loads and speeds, and reaches some 21%. An unquestionable positive effect of implementing EGR is an enormous decrease in nitric oxide levels in exhaust gases, reaching from 83 to 87% at heavier loads. The least decrease of NO_x content (about 57%) has been observed with small loads and at low engine speeds, where these values are very low, anyway. Recirculation has little effect, not to mention its variability on the contents of hydrocarbons HC . A noticeable increase in their percentage can only be observed at

¹⁾ EGR (Exhaust Gas Recirculation) – określano jako stosunek masowego strumienia recykulowanych spalin do sumy masowych strumieni tych spalin i powietrza zasysanych do cylindra.

¹⁾ EGR (Exhaust Gases Recirculation) ratio is a proportion between a mass stream of recirculated exhaust gases and a sum of mass streams of these exhaust gases and air, suctioned into a cylinder.

²⁾ KWZ – denotes the angle of ignition advance, measured in degrees of the crankshaft's rotation in relation to the top dead center of the piston (TDC).

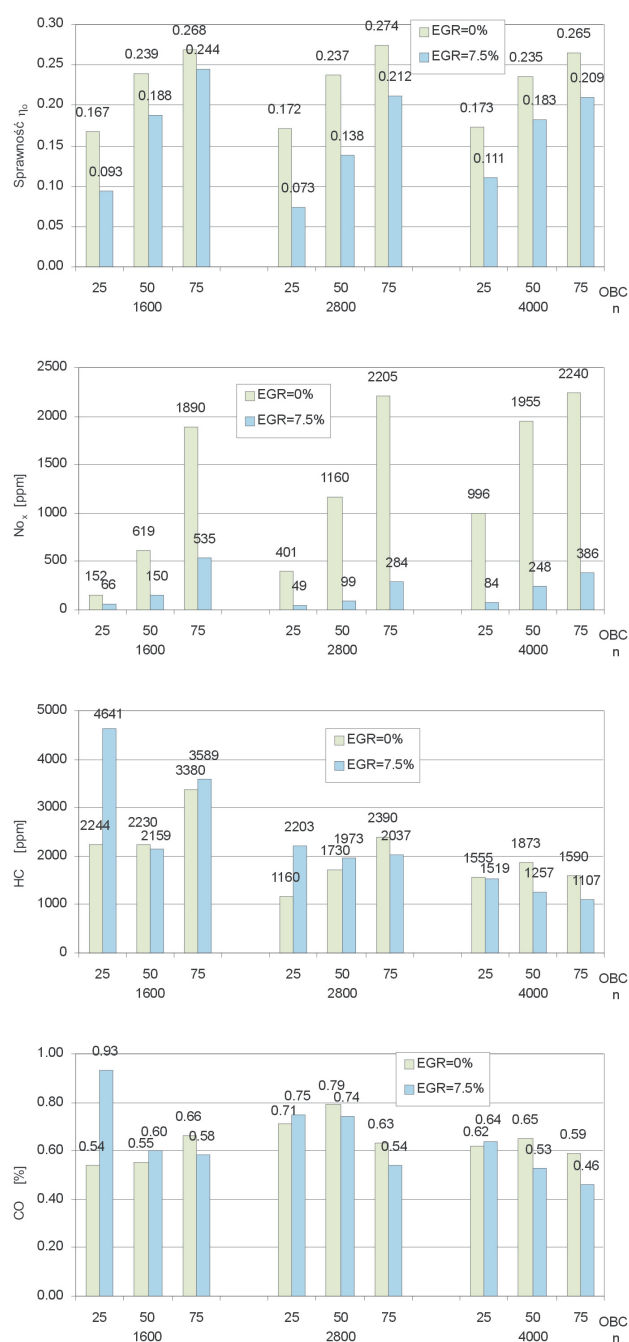


Rys. 1. Wpływ stopnia recyrkulacji spalin na podstawowe parametry pracy silnika i toksyczność spalin przy $n = 2800$ obr/min, $OBC = 50\%$ i standardowym KWZ

Fig. 1. Influence of exhaust gases recirculation on the engine's primary working parameters and exhaust gases toxicity; at $n = 2800$ rpm, $OBC = 50\%$ and with a standard KWZ

towym $n = 1600, 2800$ i 4000 obr/min i obciążeniom $OBC = 25, 50$ i 75% , przy standardowych wartościach KWZ²⁾. Widoczny na wykresach spadek sprawności ogólnej silnika przy $EGR = 7,5\%$ osiąga nawet wartości 45 do 48% przy małych obciążeniach oraz małych i średnich prędkościach obrotowych. Przy dużych obciążeniach i prędkościach jest nieco mniejszy i wynosi około 21%. Bezspornym, korzystnym efektem recyrkulacji jest bardzo znaczne zmniejszenie zawartości tlenków azotu w spalinach, które sięga 83 do 87% przy wyższych obciążeniach. Najmniejszy spadek zawartości NO_x , bo około 57%, występuje przy małych obciążeniach i prędkościach obrotowych, gdzie zawartość tego składnika i tak jest bardzo niewielka. Wpływ recyrkulacji na zawartość węglowodorów HC jest niewielki i nieregularny. Pewien znaczący wzrost tego składnika występuje tylko przy małych obrotach i małym obciążeniu silnika. Recyrkulacja spalin wpływa na zawartość w spalinach tlenku węgla CO , podobnie jak na węglowodory.

Z wykonanych wcześniej analiz teoretycznych i przedstawionych wyników badań podstawowych wynika, że z uwagi na znaczny spadek sprawności silnika, wraz z zasto-



Rys. 2. Wpływ prędkości obrotowej n i obciążenia OBC na sprawność ogólną i toksyczność spalin przy standardowym KWZ, dla pracy silnika z recyrkulacją $EGR = 0$ i $7,5\%$

Fig. 2. Influence of engine speed n and engine load OBC on the engine's overall efficiency and exhaust gases toxicity, with a standard KWZ setting, at EGR -rates = 0 and 7.5%

low engine speeds and with small loads. The effect of recirculation on carbon oxide CO is similar to this on hydrocarbons.

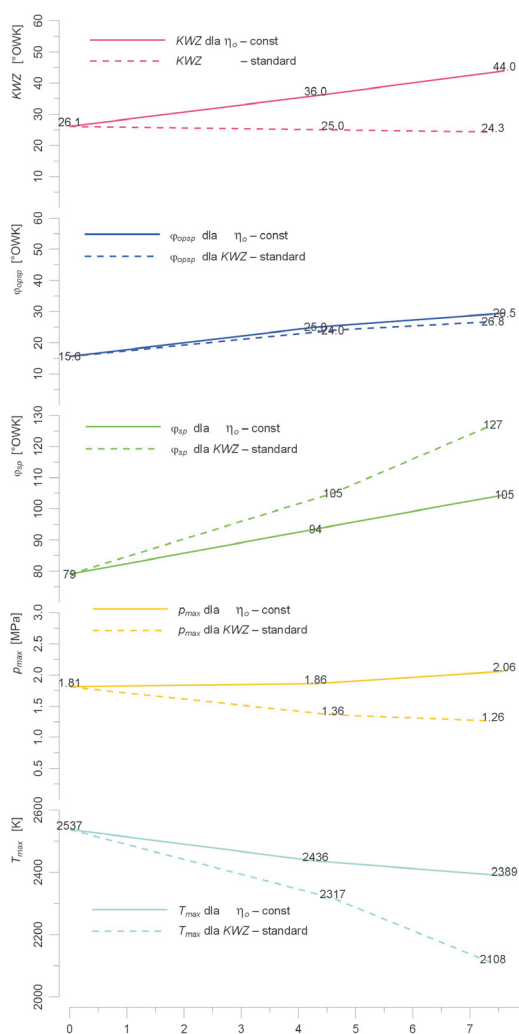
Preliminary theoretical analyses and the obtained examination results equally demonstrate that in order to compensate a considerable decrease in the engine's efficiency due to applying EGR, it is necessary to adjust the angle of advance KWZ . Please note that this method proves to be effective.

²⁾ KWZ – kąt wyprzedzenia zapłonu mierzony w stopniach obrotu wału korbowego w stosunku do górnego położenia tłoka (GMP).

sowaniem recyrkulacji konieczna jest zmiana kąta wyprzedzenia zapłonu KWZ zapobiegająca temu spadkowi. Należy jednak podkreślić, że korekcja kąta wyprzedzenia zapłonu jest skuteczna w ograniczonym zakresie wartości EGR . W badanym silniku, recyrkulacja o wartości większej niż 10%, powodowała spadek sprawności niezależnie od wartości KWZ .

4. Badanie wpływu recyrkulacji spalin na parametry procesu spalania przy korygowanym kącie wyprzedzenia zapłonu

Na rysunku 3 przedstawiono uzyskany w badaniach, wpływ recyrkulacji spalin na parametry procesu spalania, przy dokonywanej korekcji kąta wyprzedzenia zapłonu KWZ , zapewniającej utrzymanie stałej sprawności silnika.



Rys. 3. Wpływ stopnia recyrkulacji spalin na kąt zapłonu ϕ_{opsp} i kąt opóźnienia spalania ϕ_{sp} oraz maksymalne wartości ciśnienia spalania p_{max} i maksymalne temperatury obiegu T_{max} przy standardowej regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu KWZ i korekcji tego kąta zapewniającej utrzymanie stałej wartości sprawności ogólnej silnika η_0 .

Fig. 3. Influence of exhaust gases recirculation on a combustion angle ϕ_{sp} and a combustion delay angle ϕ_{opsp} , as well as maximum values of combustion pressure p_{max} and maximum temperatures of the thermal cycle T_{max} with standard advance angle setting and with its adjustment in order to maintain constant overall efficiency of the engine η_0 .

tive only for a limited range of EGR ratios. In the case of our object of examination, EGR ratios in excess of 10% resulted in a decrease in efficiency, regardless of KWZ .

4. Testing EGR 's influence on combustion parameters. Adjusted advance angle setting

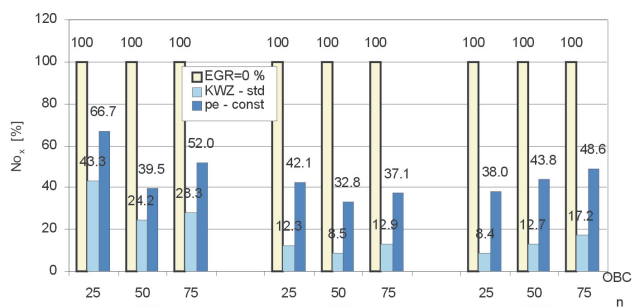
Figure 3 illustrates the effect of exhaust gases recirculation on combustion parameters, as observed during the examination, with an advanced angle setting KWZ adjusted, in order to maintain a constant efficiency of the engine. Additionally, the diagram includes previous parameter values, as observed with a standard advance angle setting.

According to the diagram, under conditions of exhaust gases recirculation, in order to maintain engine efficiency at a constant level, equal to its value without EGR , it is necessary to increase the angle of advance, proportionally to a current EGR ratio.

Thus, for EGR ratio = 7.5% the angle of advance has to be increased by 81%, i.e. by 19.7 degrees of the crankshaft's rotation. Under such conditions, a combustion delay angle ϕ_{opsp} increases by 10%, while a combustion angle decreases by 22 degrees of the crankshaft's rotation, i.e. by 21%. With KWZ adjustment, maximum values of agent pressure p_{max} and temperature T_{max} in the combustion process increase correspondingly by about 64% and 13%. Simultaneously, pressure increases by 14%, compared the values observed with no recirculation, while maximum temperature declines by about 150 K (about 6%) in comparison to the non-recirculation process.

Consequently, Figure 4 presents NO_x percentage in exhaust gases for the engine with recirculation at EGR ratio = 7.5% with standard and adjusted advance angle setting KWZ , in comparison to the engine without EGR . According to this comparison, advance angle adjustment results in a slight decrease in EGR effectiveness in the area of reducing nitric oxide levels, which verifies its suitability as a tool for fighting negative environmental impact of combustion process.

Figure 5 presents, in a form of changes in percentage of toxic components of exhaust gases, the ultimate effect of



Rys. 4. Procentowe porównanie zawartości NO_x w spalinach dla silnika z recyrkulacją $EGR = 7.5\%$ dla standardowej i korygowanej wartości KWZ , w stosunku do silnika bez recyrkulacji

Fig. 4. NO_x percentage in exhaust gases for the engine with recirculation at EGR ratio = 7.5% with standard and adjusted advance angle setting KWZ , in comparison to the engine without EGR

Dodatkowo na wykresie zamieszczono wartości analizowanych parametrów uzyskane wcześniej przy standardowej regulacji tego kąta. Jak wynika z prezentowanego rysunku, w warunkach recyrkulacji spalin, utrzymanie sprawności silnika na stałym poziomie równym jej wartości bez recyrkulacji spalin, wymaga powiększania kąta wyprzedzenia wtrysku proporcjonalnie do aktualnej wartości EGR .

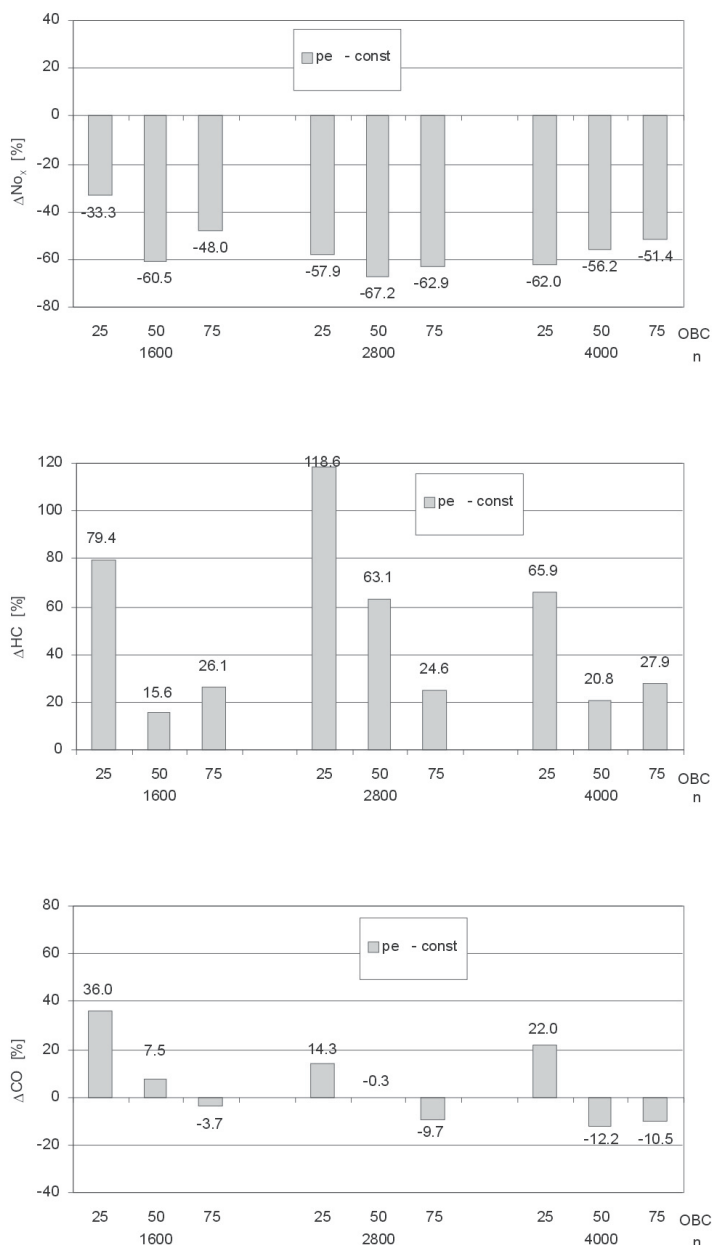
I tak dla $EGR = 7,5\%$ kąt wyprzedzenia zapłonu musi być powiększony o 81% , to jest o $19,7^\circ OWK$. Kąt opóźnienia spalania ϕ_{opsp} zwiększa się w tych warunkach o 10% , natomiast kąt spalania zmniejsza się o $22^\circ OWK$ to jest o 21% . Maksymalne wartości ciśnienia p_{max} i temperatury T_{max} czynnika w procesie spalania zwiększają się przy korekcie KWZ odpowiednio o około 64% i 13% . Przy czym wartość ciśnienia jest w tych warunkach większa o 14% od wartości występujących w procesie bez recyrkulacji, natomiast maksymalna temperatura jest mniejsza od temperatury procesu bez recyrkulacji o około 150 K , to jest o około 6% .

Z kolei na rysunku 4 przedstawiono procentowe porównanie zawartości NO w spalinach dla silnika z recyrkulacją $EGR = 7,5\%$ dla standardowej i korygowanej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu KWZ , w stosunku do silnika bez recyrkulacji spalin. Jak wynika z tego porównania, korekcja kąta wyprzedzenia zapłonu zmniejsza tylko w pewnym stopniu skuteczność recyrkulacji spalin w zakresie redukcji tlenków azotu, pozostając w dalszym ciągu istotnym narzędziem w zwalczaniu negatywnych skutków procesu spalania dla środowiska.

Ostateczny efekt recyrkulacji spalin, zapewniającej zachowanie sprawności silnika, przedstawiono w postaci procentowych zmian zawartości składników toksycznych w spalinach, odniesionych do silnika bez recyrkulacji, przedstawiono na rysunku 5. Z wykresów przedstawionych na tym rysunku wynika, że w badanym silniku po zastosowaniu recyrkulacji, nie obniżającej sprawności ogólnej silnika η_o , zawartość tlenków azotu NO_x może być zredukowana o 30 do 60% , przy czym najmniejszy efekt redukcji przypada na najmniejsze prędkości obrotowe i najmniejsze obciążenia. Jest to jednak okupione zwiększeniem zawartości w spalinach węglowodorów HC , których zawartość zwiększa się dla średnich i wysokich obciążeń o 17 do 28% (63%) a przy niskich obciążeniach w granicach 80 do 120% . Zawartość tlenku węgla CO zmienia się w granicach od -12% do $+36\%$, przy czym przyrosty dodatnie występują głównie przy małych obciążeniach.

5. Implementacja wyników badań podstawowych w systemie sterowania silnika z recyrkulacją spalin

Modyfikacja oprogramowania modułu sterującego silnika ECM3, umożliwiająca jego pracę z recyrkulacją spalin, wymaga wprowadzenia dodatkowego algorytmu sterujące-



Rys. 5. Procentowe zmiany wartości: NO_x (a), HC (b) i CO (c) w spalinach silnika z recyrkulacją $EGR = 7,5\%$ z korekcją KWZ , w porównaniu do silnika bez recyrkulacji

Fig. 5. Changes in percent values of: NO_x (a), HC (b) and CO (c) in exhaust gases of the engine with recirculation at EGR ratio = 7.5% and KWZ in adjustment, in comparison to the engine without EGR

exhaust gases recirculation, allowing to maintain the engine's efficiency, compared to the engine without EGR . Diagrams included in this figure demonstrate, that after applying EGR to the engine under examination, without diminishing its overall efficiency η_o , the content of nitric oxides NO_x can be reduced by 30 to 60% , and the least reduction effect has been observed with small loads and at low engine speeds. Nevertheless, it is compensated by higher hydrocarbons HC levels, which increase by 17 – 28% (to 63%) with medium and heavy loads, and fluctuate within the range of 80 – 120% for small loads. Carbon monoxide CO contents fluctuate within

go prądem podawanym na zawór recyrkulacyjny oraz zmiany parametrów algorytmu sterującego kątem wyprzedzenia zapłonu KWZ. Modyfikacja tego ostatniego opiera się na wynikach uzyskanych w badaniach podstawowych.

Na rysunku 6 przedstawiono tablicowy algorytm sterowania kątem wyprzedzenia zapłonu silnika standardowego (a) i po uwzględnieniu modyfikacji dla pracy z recyrkulacją spalin (b).

Natomiast ustalenie wartości prądów sterujących zaworem recyrkulacyjnym wymaga dodatkowych badań na hamowni dynamometrycznej silnika. Wynika to z faktu, że w badaniach podstawowych, omówionych wyżej, układ recyrkulacji spalin miał charakter laboratoryjny i był wyposażony w specjalne urządzenie do pomiaru masowego wydatku recyrkulowanych spalin oraz układ dokładnej regulacji ich temperatury. W warunkach użytkowych, silnik przewidziany do zabudowy w samochodzie nie posiadał takich urządzeń. W związku z powyższym, silnik ten musiał być dodatkowo poddany badaniom na hamowni w celu bezpośredniego określenia prądów sterujących zaworem recyrkulacyjnym. Technika tych badań polegała na dobraniu takich wartości tych prądów, aby przy określonej prędkości obrotowej i obciążeniu (dawce wtrysku paliwa) oraz określonym w badaniach

the range of -12% and $+36\%$, with positive increases occurring chiefly with small loads.

5. Implementation of preliminary examination results in a control system – engine with EGR

In order to allow the engine to operate with exhaust gases recirculation, it is necessary to modify ECM software by means of loading an additional algorithm to control the current, which operates the EGR valve, and to modify parameters of the angle of advance algorithm. The latter is based on results of preliminary examinations.

Figure 6 presents an algorithm table for controlling the angle of advance in a standard engine (a) and in an engine modified to operate using EGR (b).

However, additional examinations on a dynamometric engine test bed were carried out to identify values of the current, which operates the EGR valve. On the laboratory EGR system, used in the aforementioned preliminary examinations, a special device was fitted, measuring a mass flow rate of recirculated exhaust gases, together with a system for accurate adjustment of their temperature. Such instruments were absent in the engine intended for installation in a vehicle in application conditions. Therefore, in order to directly

a)

	98,9	10,0	12,0	20,5	20,3	21,8	24,0	25,0	26,4	27,0
M	91,0	10,0	12,0	17,5	18,8	20,2	21,4	22,6	24,2	27,2
A	81,1	10,0	12,0	20,2	23,8	24,2	27,0	26,1	26,4	28,8
P	70,2	8,0	12,0	20,9	26,9	28,3	29,7	29,2	28,1	30,9
	61,3	9,0	12,0	24,5	28,9	31,2	32,5	34,0	31,1	33,5
k	52,4	9,0	12,0	16,0	31,0	32,3	33,5	36,0	34,1	36,0
P	43,5	9,0	12,0	16,5	32,0	33,2	34,5	37,9	38,7	39,8
a	35,6	9,0	12,0	16,5	28,3	31,5	34,6	42,0	43,8	43,9
	27,7	9,0	10,0	11,0	12,0	14,0	16,0	18,0	18,0	20,0
		900	1100	1600	2200	2700	3200	3800	5200	6000

Prędkość obrotowa [obr/min]/Engine speed [rpm]

b)

	98,9	8,0	10,0	20,5	23,3	25,5	29,6	29,8	31,0	36,0
M	91,0	8,0	10,0	22,1	26,8	29,6	29,0	28,6	29,2	31,3
A	81,1	8,0	10,0	33,0	34,2	35,0	33,2	32,1	32,8	34,8
P	70,2	8,0	12,0	34,7	35,3	36,9	37,0	37,2	36,5	38,3
	61,3	9,0	12,0	33,5	34,7	36,9	42,3	44,8	44,0	43,2
k	52,4	9,0	12,0	16,0	29,6	34,0	37,2	41,6	40,7	42,7
P	43,5	9,0	12,0	16,5	32,0	33,2	35,3	42,0	42,9	43,2
a	35,6	9,0	12,0	16,5	28,3	31,5	35,6	43,0	44,8	44,9
	27,7	9,0	10,0	18,0	24,5	30,0	35,9	43,0	44,0	45,0
		900	1100	1600	2200	2700	3200	3800	5200	6000

Prędkość obrotowa [obr/min]/Engine speed [rpm]

Rys. 6. Tablicowy algorytm sterowania kątem wyprzedzenia zapłonu KWZ [°OWK], a) silnika standardowego, b) zmodyfikowany dla silnika z recyrkulacją spalin

Fig. 6. Algorithm table – Angle of ignition advance [degrees of crankshaft's rotation]: a) – standard engine, b) – modified for EGR engine

a)

	98,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	91,0	0	0	8,0	7,7	7,5	7,20	7,8	7,6	7,4
A	81,1	0	0	8,0	5,1	4,3	6,1	7,4	7,2	7,1
P	70,2	0	0	6,0	4,5	3,0	5,1	7,2	7,0	6,7
	61,3	0	0	4,5	3,0	2,5	4,9	6,3	6,1	6,0
k	52,4	0	0	0	2,0	1,0	2,5	3,3	3,0	2,7
P	43,5	0	0	0	0	0	2,0	2,5	2,0	2,0
a	35,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		900	1100	1600	2200	2700	3200	3800	5200	6000

Prędkość obrotowa [obr/min]/Engine speed [rpm]

b)

	98,9	0	0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
M	91,0	0	0	24,5	26,9	28,6	30,8	29,8	29,6	25,0
A	81,1	0	0	26,1	28,8	28,2	29,9	30,2	29,6	25,0
P	70,2	0	0	27,2	29,0	27,9	29,5	29,47	31,2	25,0
	61,3	0	0	29,6	30,9	28,7	26,2	31,1	33,0	25,0
k	52,4	0	0	20,0	32,7	30,8	28,6	34,2	34,8	25,0
P	43,5	0	0	0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
a	35,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	27,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		900	1100	1600	2200	2700	3200	3800	5200	6000

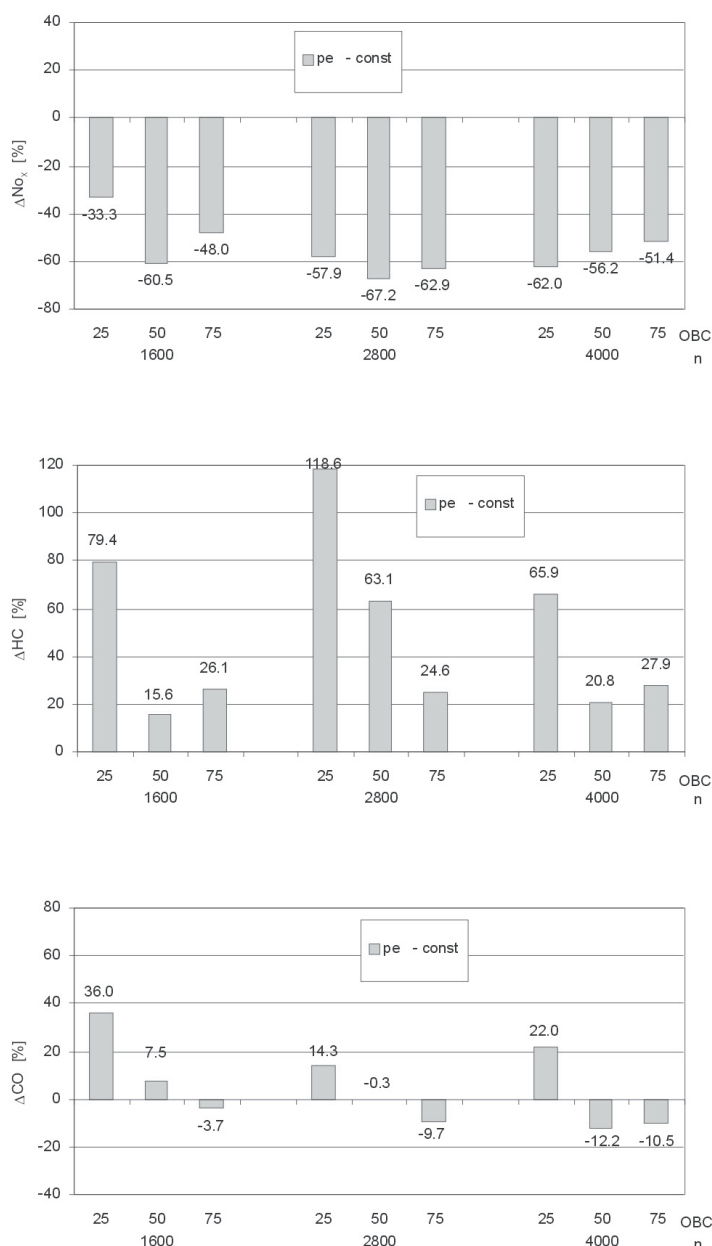
Prędkość obrotowa [obr/min]/Engine speed [rpm]

Rys. 7. Tablicowy algorytm sterowania zaworem EGR z optymalnymi wartościami stopnia recyrkulacji (a) oraz z wartościami prądów sterujących zaworem EGR (b)

Fig. 7. Algorithm table – EGR valve control. Includes optimal values of EGR ratio (a) and values of the current, which operates the EGR valve (b)

podstawowych, skorygowanym kącie wyprzedzenia wtrysku, silnik uzyskiwał moment obrotowy równy momentowi tego silnika bez recyrkulacji i korekcji kąta wyprzedzenia zapłonu. Na rysunku 7 przedstawiono algorytmy uzyskane w badaniach implementacyjnych. Tablica (a) przedstawia wartości stopni recyrkulacji w procentach EGR, natomiast tablica (b) stanowi algorytm sterowania zaworem recyrkulacyjnym i zawiera wartości odpowiednich prądów sterujących.

Na rysunku 8 przedstawiono zawartości składników toksycznych w spalinach, uzyskane po ostatecznym ustaleniu algorytmów sterowania kątem wyprzedzenia zapłonu (rys. 6b) i zaworem recyrkulacyjnym (rys. 7b). Na wykresach przedstawiono wyniki uzyskane dla trzech prędkości obrotowych:



Rys. 8. Porównanie zawartości NO_x (a), HC (b) CO (c) w spalinach dla wybranych punktów pracy silnika z recyrkulacją spalin i bez recyrkulacji

Fig. 8. NO_x (a), HC (b) and CO (c) percentages in exhaust gases for selected aspects of the engine's functioning (the engine with recirculation, compared to the engine without EGR)

identify values of the current operating the EGR valve, the engine had to be additionally tested on a test bed. The examination technique was to identify such values of this current, at which the engine's output torque (at a given engine speed and load/dose of injected fuel and advanced angle setting, as established in the course of preliminary examinations) is equal to this engine's torque without EGR and advanced angle setting adjustment. Fig. 7 presents algorithms obtained during implementation tests. Table (a) shows EGR ratio percentages, while table (b) is an algorithm for controlling the EGR valve and contains values of the control current.

Fig. 8 shows the level of toxins in exhaust gases, as observed after identifying ultimate algorithms for controlling the angle of advance (Fig. 7b) and the EGR valve (Fig. 7b). Diagrams include results obtained for three engine speed values: 1600, 3200 and 5200 rpm and three values of engine load, measured through recording the absolute pressure in the intake manifold: 91, 70 and 52 kPa. For each aspect of the engine's functioning, two values of a parameter have been given, corresponding to "EGR off" (green bars) and "EGR on" (blue bars).

Fig. 8a illustrates a change in nitric oxide NO_x levels in exhaust gases after applying recirculation. In every aspect of the engine's functioning a positive impact of recirculation is observed, more significant at higher engine speeds and larger engine loads. Nevertheless, recirculation negatively affects the content of the other two toxic components: hydrocarbons HC (Fig. 8b) and carbon monoxide CO (Fig. 8c). Recirculation caused an increase in hydrocarbon levels within the whole range of the engine's operation, particularly at higher engine loads and moderate engine speeds, and some increase in carbon monoxide levels, chiefly at higher engine speeds. Please note that these results are similar in nature and close in values to results obtained in aforementioned preliminary examinations.

6. Vehicle test bed examinations – engine with EGR installed in a vehicle

Experimental tests on the vehicle test bed were intended to ultimately confirm the correctness of EGR control algorithms developed and to verify the assumption, that applying exhaust gases recirculation will result in a drop of nitric oxide levels in exhaust gases to the extent required by EURO III examination. A small 704 ccm engine has been chosen as the object of examination, four-stroke type with MPI fuel injection control, installed in a small car. Fig. 9 shows a general view of the vehicle test bed at BOSMAL Research and Development Centre in Bielsko-Biała and of the car, ready for examination tests.

The same engine, but before adjustments and without EGR system, was subject to previous examinations and passed the EURO II test. Nevertheless,

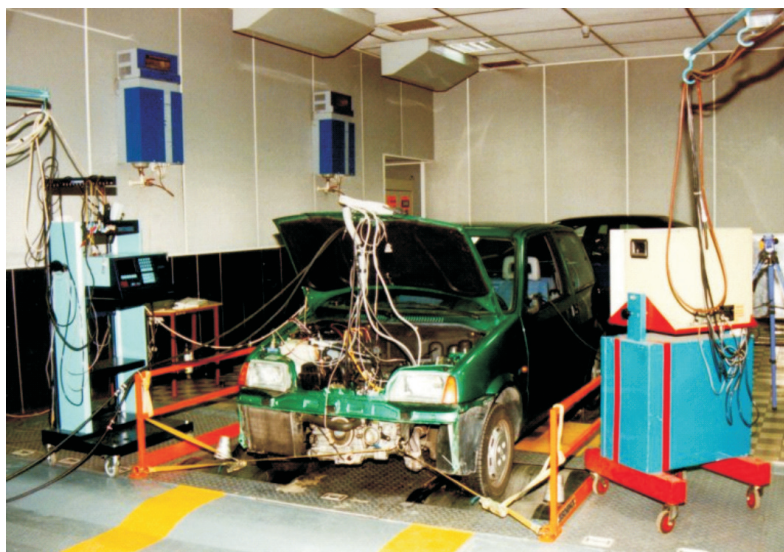
1600, 3200 i 5200 obr/min i trzech obciążeni silnika mierzonych bezwzględnym ciśnieniem w kolektorze ssącym: 91, 70 i 52 kPa. Dla każdego punktu pracy silnika podano dwie wartości danego parametru, odpowiadające wyłączonej recyrkulacji – słupki zielone i włączonej – słupki niebieskie.

Na rysunku 8a pokazano zmianę zawartości tlenków azotu NO_x w spalinach uzyskaną w wyniku zastosowania recyrkulacji spalin. We wszystkich stanach pracy silnika występuje korzystny wpływ recyrkulacji, znacznie większy dla większych obciążeń i większych prędkości obrotowych. Z kolei w niekorzystny sposób recyrkulacja odbija się na zawartości w spalinach pozostałych dwóch toksycznych składników, to jest węglowodorów HC (rys. 8b) i tlenku węgla CO (rys. 8c). Zastosowanie recyrkulacji powodowało wzrost węglowodorów w całym zakresie pracy silnika a szczególnie przy średnich prędkościach obrotowych i większych obciążeniach oraz pewien wzrost tlenku węgla występujący głównie przy dużych prędkościach obrotowych. Należy zauważyć, że uzyskane w tych badaniach wyniki mają podobny charakter zmian i są zbliżone wartościami do wyników uzyskanych w badaniach podstawowych omówionych wcześniej.

6. Badania na hamowni podwoziowej silnika z recyrkulacją spalin zabudowanego w samochodzie

Badania doświadczalne na hamowni podwoziowej miały na celu ostateczną weryfikację opracowanych algorytmów sterowania recyrkulacją spalin oraz potwierdzenie założenia, że zastosowanie recyrkulacji spalin ograniczy zawartość tlenków azotu w spalinach w stopniu umożliwiającym spełnienie wymagań testu EURO III. Obiektem badań był dwucylindrowy silnik czterosuwowy o pojemności 704 cm³, z wielopunktowym wtryskiem paliwa, zabudowany w małym samochodzie osobowym. Na rysunku 9 pokazano ogólny widok hamowni podwoziowej Ośrodka Badawczo-Rozwojowego BOSMAL w Bielsku-Białej z samochodem przygotowanym do badań testowych.

Wcześniejsze badania wykonane dla tego samego silnika, bez zmian regulacyjnych i bez recyrkulacji spalin, wykazały, że spełnia on wymagania testu EURO II. Po porównaniu zawartości tlenków azotu, zmierzonych w tych badaniach z limitami EURO III okazało się, że przekraczają one te limity o około 60% (rys. 10). Wynik ten potwierdził konieczność zastosowania recyrkulacji spalin. Pierwszą próbę silnika z recyrkulacją wykonano według normy EURO II w celu określenia wpływu recyrkulacji na emisję toksycznych składników

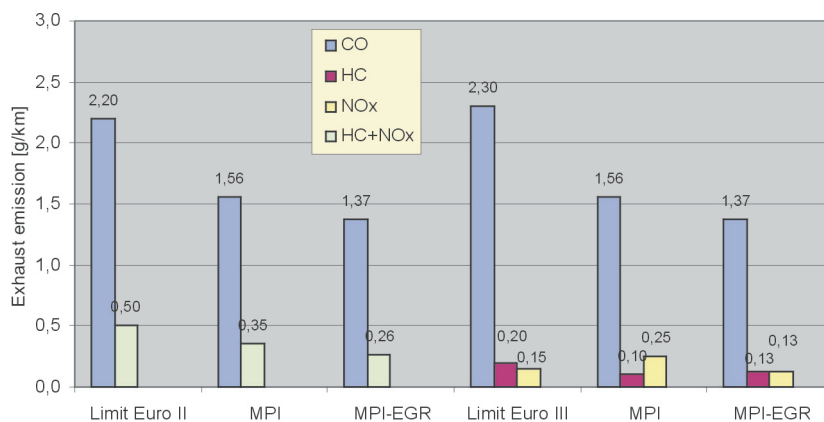


Rys. 9. Widok hamowni podwoziowej OBRSM „BOSMAL” z przygotowanym do badań samochodem

Fig. 9. View of the test bench at BOSMAL R&DC in Bielsko-Biala and of the car, ready for testing

it appeared that nitric oxide levels measured during these examinations exceed EURO III limits by about 60% (Fig. 10). This proved the necessity to apply exhaust gases recirculation. In order to identify EGR's impact on toxic components emission (of nitric oxides in particular), the first test on the engine with EGR has been executed according to EURO II specifications. This test was successful and confirmed our expectations (see Fig. 10). Hydrocarbon HC and carbon monoxide CO levels in exhaust gases remained similar to those of the engine without EGR, while nitric oxide content NO_x decreased twofold. This led us to a supposition, that under conditions of EURO III examination, the EURO III limits would also be met, at least for this component.

Fig. 11 presents EURO III examination results. Apparently, a new control system for the engine with EGR caused a double decrease in nitric oxide levels in exhaust gases. These values meet EURO III limits with a margin of 20–27%.



Rys. 10. Porównanie wyników badań toksyczności wg testu EURO II silnika z zasilaniem MPI bez recyrkulacji oraz MPI-EGR z recyrkulacją spalin, z limitami EURO II i EURO III

Fig. 10. EURO II and EURO III limits comparison with EURO II toxicity test results for MPI engine with and without EGR

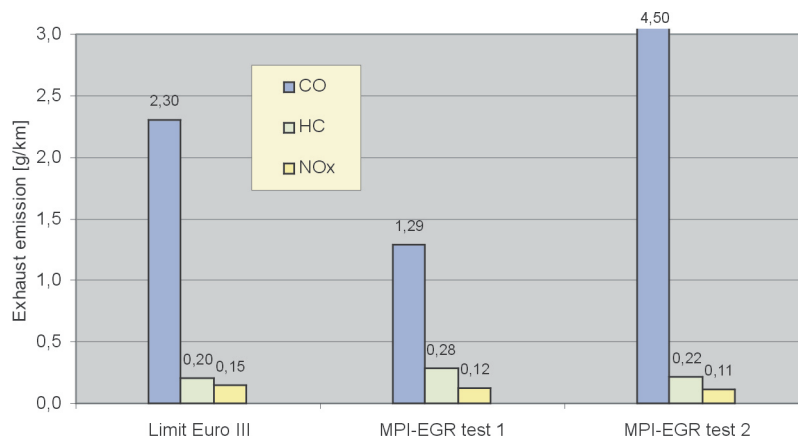
w spalinach a szczególnie na ograniczenie emisji tlenków azotu. Wynik tej próby zilustrowany na rysunku 10 był pozytywny i potwierdził oczekiwania. Zawartości węglowodorów HC i tlenku węgla CO w spalinach pozostały na zbliżonym poziomie jak dla silnika bez recyrkulacji, natomiast zawartość tlenków azotu NO_x zmniejszyła się prawie dwukrotnie. Pozwoliło to domniemywać, że również zostaną spełnione limity EURO III w warunkach testu EURO III, przynajmniej w zakresie tego składnika.

Na rysunku 11 przedstawiono wyniki badań wykonanych według wymagań testu EURO III. Jak można zauważyć, przygotowany system sterowania silnika wyposażonego w układ recyrkulacji spalin, zmniejszył zawartości tlenków azotu w spalinach prawie dwukrotnie spełniając z zapasem 20 do 27% wymagania normy EURO III.

Należy natomiast zwrócić uwagę na niespełnienie tej normy w zakresie zawartości węglowodorów (rys. 11, test 1). Wynika to z faktu rozszerzenia testu EURO III w stosunku do testu EURO II o rozpoczęcie cyklu jezdny przy zimnym silniku, już po upływie 10 sekund od chwili jego uruchomienia. Z kolei system sterowania, spełniający test EURO II, nie posiadał dynamicznej procedury kontrolowania dawki paliwa w funkcji prędkości otwierania przepustnicy, szczególnie ważnej przy obciążaniu i przyspieszaniu zimnego silnika. Zbyt uboga mieszanka w warunkach przyspieszania i obciążania zimnego silnika powodowała wypadanie zapłonów i w konsekwencji wzrost zawartości węglowodorów w spalinach. Statyczne wzbogacanie mieszanki zastosowane w okresie przejściowym, tylko częściowo ograniczało węglowodory, powodując jednocześnie znaczne zwiększenie zawartości w spalinach tlenku węgla (rys. 11, test 2). Niezależnie jednak od tego zastosowany układ recyrkulacji spalin spełnił swoją funkcję, ograniczając zawartość tlenków azotu w spalinach ze znacznym zapasem spełniając wymagania normy EURO III.

7. Podsumowanie i wnioski

1. Przeprowadzone badania recyrkulacji spalin, potwierdziły jej skuteczność w obniżaniu zawartości tlenków azotu w spalinach. Wykazały również, że jej zastosowanie, bez korekty parametrów sterowania kątem wyprzedzenia zapłonu, znacznie zmniejsza zawartość tych tlenków ale równocześnie pociąga za sobą znaczne pogorszenie parametrów użytkowych silnika, takich jak średnie ciśnienie użyteczne i sprawność ogólna silnika.
2. W badaniach wykazano, że w pewnym ograniczonym zakresie udziału spalin w świeżym ładunku cylindra, nie przekraczającym 10%, można całkowicie wyeliminować niekorzystne oddziaływanie recyrkulacji spalin na osiągi silnika, poprzez odpowiedni dobór wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Wprawdzie korekta tego kąta zmniejsza redukujące działanie recyrkulacji spalin na zawartość tlenków azotu



Rys. 11. Porównanie wyników badań toksyczności spalin silnika z zasileniem MPI-EGR w badaniach według testu EURO III

Fig. 11. EURO III toxicity tests results comparison for MPI engine with EGR

Please note, that hydrocarbons value did not meet the requirements of the standard (Fig. 11, test 1). It is caused by the fact, that compared to EURO II, EURO III examination has been extended to include the beginning of the drive cycle, i.e. the cold engine period, which begins as early, as 10 seconds after engine start, while the engine control system, which passed the EURO II test, had not been equipped with a dynamic procedure to control fuel dose in relation to the opening speed of the throttle, which is particularly important under conditions of accelerating a cold engine. Too lean a mixture caused misfiring, which led to an increase in the level of hydrocarbons in the exhaust gases. Hydrocarbon emission could be partially limited by static mixture enrichment, used in the transition. This however resulted in a substantial increase of carbon monoxide emission in the exhaust gases (Fig. 11, test 2). Nevertheless, the exhaust gases recirculation system has fulfilled its purpose, limiting nitric oxide levels in the exhaust gases and meeting EURO III limits with a considerable margin.

7. Summary and Conclusions

1. The research on exhaust gases recirculation proved this method effective in reducing nitric oxides level in exhaust gases. It also demonstrated, that applied without adjusting of the advance angle control parameters, this method significantly decreases the level of oxides, but seriously impairs the engine operating parameters, such as mean effective pressure and overall efficiency.
2. During the course of examinations it has been established, that EGR's negative influence on the engine performance can be completely eliminated by setting a proper angle of advance, within a certain limited range of exhaust gases contribution in a fresh fuel-air mixture (not exceeding 10%). Such adjustment diminishes the EGR effect of reducing nitric oxides level in exhaust gases. Nevertheless, the ultimate outcome is positive and enables a twofold reduction of this level, as measured during EURO road tests.

- w spalinach, jednak ostateczny efekt recyrkulacji jest korzystny i pozwala na prawie dwukrotne zmniejszenie tego składnika, mierzonego w testach jezdnych EURO.
3. Proces recyrkulacji spalin, szczególnie w warunkach korekty kąta wyprzedzenia zapłonu, utrzymującej na stałym poziomie osiągi silnika, praktycznie nie powoduje zmiany poziomu zawartości tlenu węgla w spalinach, natomiast pociąga za sobą zwiększenie zawartości w tych spalinach węglowodorów, sięgające w ramach testów EURO do 30%.
 4. Ograniczenie toksyczności spalin, wynikające z kolejno zastrzanych limitów EURO III i EURO IV, wymaga oprócz stosowania recyrkulacji spalin, dodatkowych zabiegów związanych z uwzględnianiem w algorytmach sterowania szybkości zmian w położeniu otwarcia przepustnicy oraz doskonalenia geometrii komory spalania.

3. The exhaust gases recirculation process causes virtually no increase in carbon monoxide levels in exhaust gases, especially when combined with adjustment of advance angle (in order to maintain the engine's efficiency at a constant level), although it results in an increase in hydrocarbons content. According to EURO tests, the increase reaches 30%.
4. Successively growing stringency of exhaust gases toxicity limits, imposed by the EURO III and EURO IV standards, requires complementing control algorithms with a dynamic procedure to control fuel dose in relation to the opening speed of the throttle, and perfecting the combustion chamber's geometry.

Artykuł recenzowany

Skróty i oznaczenia/Nomenclature

CO	tlenek węgla; <i>carbon oxide</i>
ECM	moduł sterujący silnika; <i>engine control module</i>
EGR	recyrkulacja spalin; <i>exhaust gas recirculation</i>
EURO II, EURO III	europejskie normy emisji spalin; <i>european exhaust emission regulation</i>
HC	węglowodory; <i>hydrocarbons</i>
KWZ	kąt wyprzedzenia zapłonu; <i>advance angle</i>
MAP	ciśnienie bezwzględne powietrza; <i>manifold air pressure</i>
MPI	wielopunktowy wtrysk paliwa (do kanałów dolotowych); <i>multi point injection</i>
n	prędkość obrotowa; <i>engine speed</i>

NO_x	tlenki azotu; <i>nitric oxide</i>
OBC	obciążenie silnika; <i>engine load</i>
p_e	ciśnienie użyteczne; <i>effective pressure</i>
p_{max}	maksymalne ciśnienie ładunku w cylindrze; <i>maximum cylinder pressure</i>
T_{max}	maksymalna temperatura ładunku w cylindrze; <i>maximum cylinder temperature</i>
η_o	sprawność ogólna; <i>engine efficiency</i>
φ_{opsp}	kąt opóźnienia spalania; <i>combustion delay angle</i>
φ_{sp}	kąt spalania; <i>combustion angle</i>

Literatura/Bibliography

- [1] Sobieszczański M., Pietras D.: Badania modelowe wpływu recyrkulacji spalin na obieg termodynamiczny silnika o zapłonie iskrowym. Journal of KONES'2000 nr 1-2, s. 473–484. 26th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES'2000, Warsaw–Lublin.
- [2] Sobieszczański M., Knefel T., Pietras D.: Dobór algorytmów sterowania rozruchem, nagrzewaniem, wolnymi obrotami oraz recyrkulacją spalin silnika o zapłonie iskrowym zasilanego w systemie wtrysku MPI. Archiwum Motoryzacji 2002 nr 2-3, str. 53–67.
- [3] Pietras D.: Badanie wpływu recyrkulacji spalin na parametry termodynamiczne ładunku roboczego i osiągi silnika o zapłonie iskrowym. Rozprawa doktorska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 10.01.2003.

** Prof. dr hab. inż. Maciej Sobieszczański – profesor zwyczajny i kierownik Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, wiceprzewodniczący Rady Naukowej Ośrodka Badawczo-Rozwojowego BOSMAL w Bielsku-Białej.

Prof. Maciej Sobieszczański D.Sc., Ph.D. M.E. – Full Professor, Department Head, Department of Internal Combustion Engines and Vehicles, University of Bielsko-Biala; Vice-Chairman of the Scientific Board, BOSMAL Research and Development Centre in Bielsko-Biala.



* Dr inż. Dariusz Pietras – adiunkt w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.

Mr Dariusz Pietras Ph.D. M.E. – Department of Internal Combustion Engines and Vehicles, University of Bielsko-Biala.

