

SŁAWOMIR LUFT, TOMASZ SKRZEK*

DWUPALIWOWY SILNIK O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM – PRZEGLĄD WYBRANYCH WYNIKÓW BADAŃ

DUAL-FUEL COMPRESSION IGNITION ENGINE – RESULT OF THE INVESTIGATION

Streszczenie

W Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Politechniki Radomskiej od lat prowadzone są badania dwupaliwowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym od inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. W artykule dokonano przeglądu wyników badań dotyczących silnika zasilanego takimi paliwami głównymi jak: alkohol metylowy, alkohol etylowy, propanbutan, gaz naturalny. Uzyskane wyniki w zakresie osiągnięć silnika, jego sprawności ogólnej oraz zawartości składników w spalinach porównano dla różnych rodzajów paliwa głównego. W podsumowaniu zauważono pewne wspólne charakterystyczne cechy silnika dwupaliwowego niezależne od rodzaju stosowanego paliwa głównego.

Słowa kluczowe: silnik dwupaliwowy, metanol, etanol, LPG, CNG

Abstract

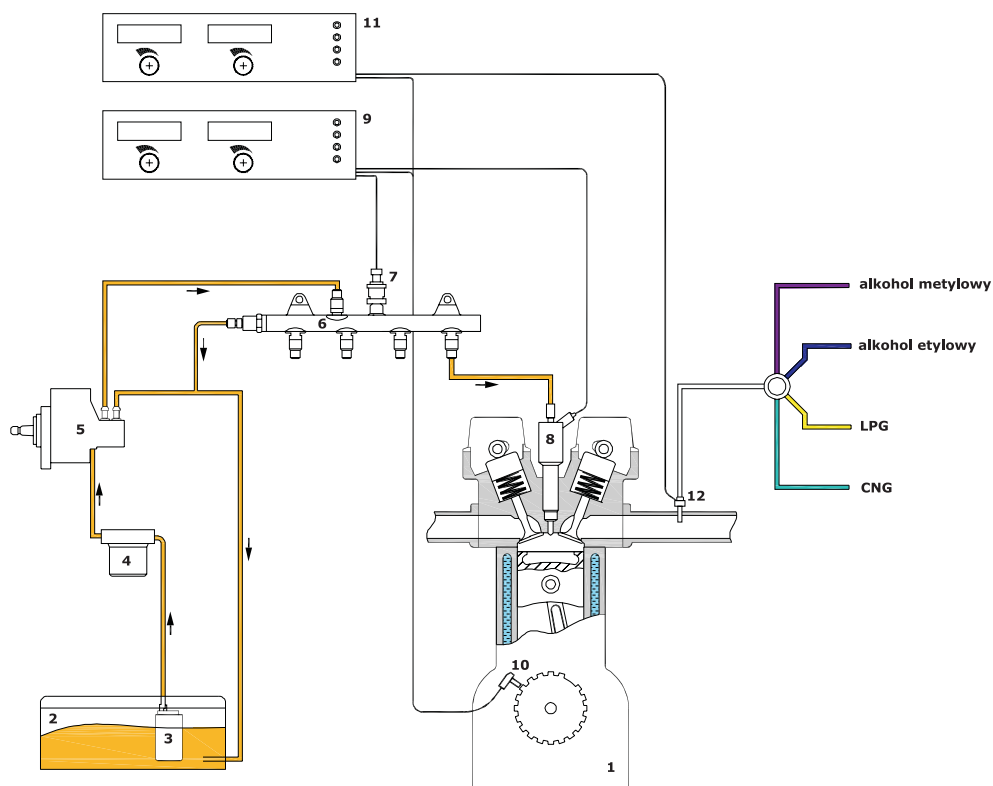
The staff of the Institute of Vehicles and Machines Maintenance in Radom Technical University has been involved, for many years, in research projects relating to a dual-fuel compression ignition engine with the pilot diesel fuel injection. The paper presents results of the investigation on such engine operating on the following fuels: methanol, ethanol, LPG and natural gas. The obtained results regarding engine performances, overall efficiency and harmful exhaust emissions were compared for various main fuels. In result, some common features of the investigated dual-fuel engine were revealed, regardless of the kind of the applied main fuel.

Keywords: dual-fuel engine, methanol, ethanol, LPG, CNG

* Prof. dr hab. inż. Sławomir Luft, mgr inż. Tomasz Skrzek, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska.

1. Wstęp

Wobec przewidywanego zmniejszania się wydobycia ropy naftowej, a także coraz ostrzejszych norm związanych z ochroną środowiska powstają różne koncepcje modyfikacji systemu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym umożliwiające spalanie innych paliw, dotychczas nietypowych dla tego typu silników. Obserwuje się, że coraz częściej prowadzone są badania dwupaliwowego zasilania silnika, w którym dawka oleju napędowego stosowana jest jedynie do inicjacji zapłonu paliwa głównego zazwyczaj o małej wartości liczby cetanowej [1–5]. Ogólny schemat obrazujący taki system zasilania przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Ogólny schemat dwupaliwowego systemu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym, w którym głównym paliwem zamiennie jest: metanol, etanol, propan-butan, gaz ziemny; 1 – silnik, 2 – zbiornik ON, 3 – pompa paliwa, 4 – filtr paliwa, 5 – pompa wys. ciś, 6 – zasobnik, 7 – czujnik ciśnienia, 8 – wtryskiwacz ON, 9 – sterownik CR, 10 – czujnik położenia wału korbowego, 11 – sterownik paliwa głównego, 12 – wtryskiwacz paliwa głównego

Fig. 1. Overall scheme of dual fuelling of a compression ignition engine where the main fuel is (interchangeably): methanol, ethanol, LPG and CNG; 1 – engine, 2 – DF reservoir, 3 – fuel pump, 4 – fuel filter, 5 – high pressure pump, 6 – rail, 7 – pressure sensor, 8 – DF injector, 9 – CR controller, 10 – crankshaft position sensor, 11 – main fuel controller, 12 – main fuel injector

Przy tak przyjętej koncepcji rozwiązania układu zasilania jednym z ważniejszych zagadnień jest dobór wartości inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz kąta wyprzedzenia wtrysku tej dawki. Obie te wartości wpływają bowiem w sposób istotny na osiągi silnika, jego sprawność, a także poziom zawartości składników w spalinach. W większości rozwiązań regulacja mocy silnika zrealizowana jest zmianą wartości dawki paliwa głównego, co prowadzi do zmienności składu mieszaniny tegoż paliwa z powietrzem wraz ze zmianą obciążenia silnika.

Wydaje się, że za wyborem takiej koncepcji dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie samoczynnym przemawiają następujące pozytywne efekty:

- możliwość uzyskania porównywalnych osiągnięć z wersją standardową silnika (zasilanego klasycznie olejem napędowym). Za tym stwierdzeniem przemawia fakt porównywalnej wartości opalowej mieszaniny stechiometrycznej oleju napędowego z powietrzem i takich paliw jak: metanol, etanol, propan-butan i gaz ziemny, które mogą być brane pod uwagę jako paliwa główne w proponowanym systemie zasilania;
- możliwość uzyskania poprawy sprawności ogólnej silnika dwupaliwowego. W tego typu silniku istnieje bowiem możliwość zrealizowania procesu spalania w krótkim czasie i przeprowadzenia tego procesu przy korzystnym położeniu wału korbowego z punktu widzenia uzyskania dużej pracy indykowanej obiegu. Należy tu zwrócić uwagę na zbliżenie tego procesu spalania do coraz częściej badanego i opisywanego systemu spalania objętościowego HCCI (homogeneous-charge compression ignition);
- omawiany system dwupaliwowy umożliwia jednocześnie kontrolę rozpoczęcia procesu spalania poprzez regulację kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego;
- łatwość rozruchu silnika dwupaliwowego, gdyż proces ten może być realizowany jedynie przy użyciu oleju napędowego;
- możliwość uzyskania poprawy składu spalin, gdyż paliwo główne (gaz ziemny, LPG w fazie gazowej, pary metanolu) jest bardzo dobrze wymieszane z powietrzem w czasie suwu dolotu i sprężania tworząc korzystną z punktu widzenia składu spalin homogeniczną mieszaninę paliwa i powietrza;
- niewielki zakres przeróbki silnika bazowego polegający na zabudowaniu systemu dostarczenia paliwa głównego do kolektora dolotowego bez konieczności ingerencji w konstrukcję podstawowych zespołów silnika bazowego.

Istnieją także negatywne zjawiska wynikające z dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. Należą do nich:

- możliwość występowania niekontrolowanych samozapłonów mieszaniny paliwa głównego z powietrzem pod koniec suwu sprężania, szczególnie przy większych obciążeniach silnika, kiedy to sprężana mieszanina powietrzno-paliwowa staje się bogatsza. Sposobem na odsunięcie niebezpieczeństwa występowania tego zjawiska jest ograniczenie udziału paliwa głównego lub zmniejszenie stopnia sprężania;
- możliwość spalania stukowego mieszaniny powietrza i paliwa głównego – poza obszarem spalania dawki inicjującej na skutek gwałtownego wzrostu ciśnienia po rozpoczęciu spalania. Sposobem na ograniczenie tego zjawiska jest jego identyfikacja przy użyciu czujnika stuku i opóźnienie momentu początku wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego lub zmniejszenie stopnia sprężania (jak ma to miejsce w prototypowych rozwiązaniach silników o ZI, np. Saab, Nissan, MCE-5).

W Zakładzie Silników Spalinowych i Pojazdów Politechniki Radomskiej od lat prowadzone są badania opisanego systemu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym przy użyciu różnych paliw głównych i każdorazowo z inicjacją zapłonu od dawki oleju napędowego. W niniejszym artykule podjęta została próba porównań i pewnych uogólnień, co do osiągnięć, sprawności, emisji związków szkodliwych w spalinach dla różnych stosowanych paliw głównych oraz różnych sposobów dostarczania tych paliw do kolektora dolotowego.

Porównano wyniki badań dla następujących przypadków zasilania silnika dwupaliwowego:

- a) zasilanie odparowanym alkoholem metylowym z wykorzystaniem mieszalnika w kolektorze dolotowym (wtrysk dawki oleju napędowego z wykorzystaniem klasycznej sekcyjnej pompy wtryskowej),
- b) zasilanie ciekłym alkoholem etylowym z wtryskiwaczem umieszczonym w kolektorze dolotowym (wtrysk dawki oleju napędowego z wykorzystaniem systemu common rail).
- c) zasilanie ciekłym paliwem propan-butan (LPG) z wtryskiwaczem umieszczonym w kolektorze dolotowym (wtrysk dawki oleju napędowego z wykorzystaniem systemu common rail).
- d) zasilanie gazem ziemnym wtryskiwanym w fazie lotnej do kolektora dolotowego (wtrysk dawki oleju napędowego z wykorzystaniem systemu common rail).

We wszystkich opisanych wyżej przypadkach badania przeprowadzono na jednocylindrowym stacjonarnym silniku o zapłonie samoczynnym 1HC102.

2. Wyniki badań osiągnięć oraz sprawności silnika dwupaliwowego

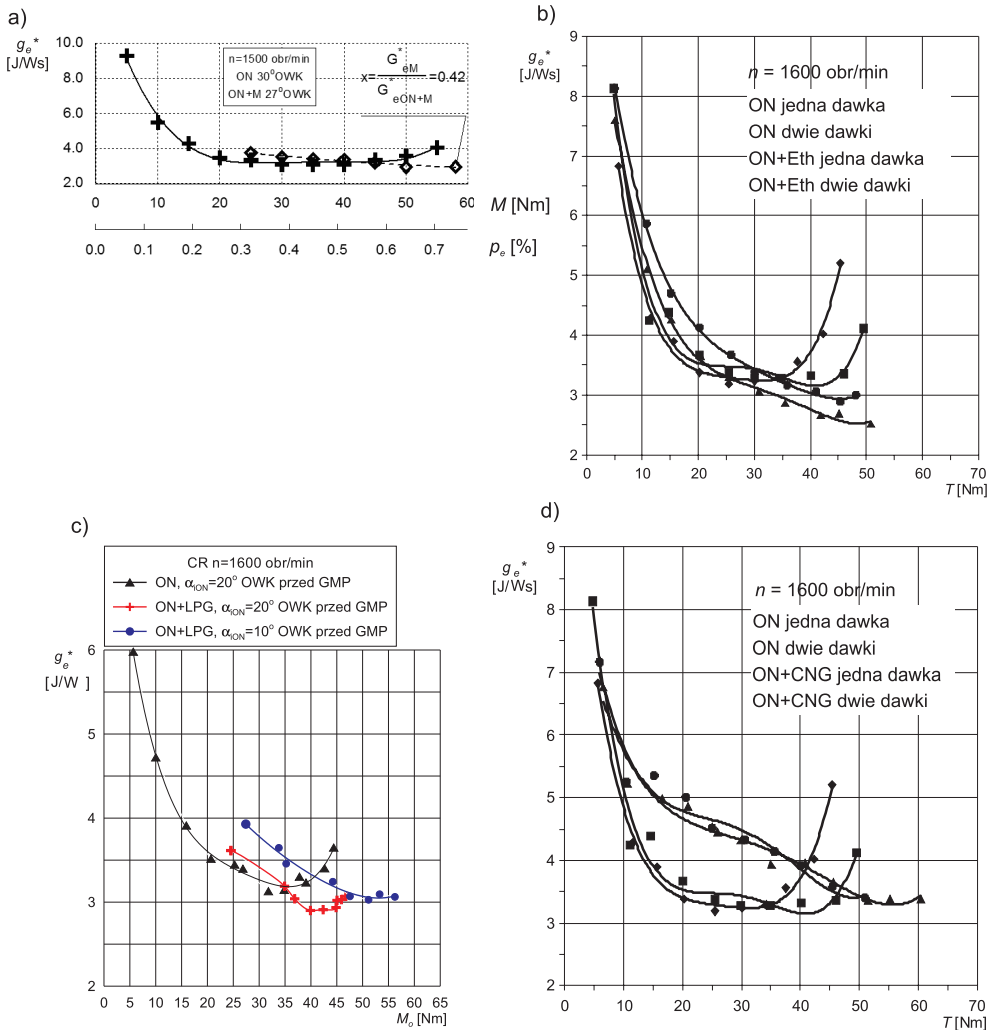
Badania przeprowadzono w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych. Wyniki przedstawiono w postaci charakterystyk jednostkowego zużycia energii wobec faktu różnych wartości opałowych stosowanych paliw.

Poniżej zestawiono charakterystyki sporządzone przy podobnych prędkościach obrotowych badanych wersji silnika. Przytoczono te charakterystyki, które uzyskano dla poprawnie dobranych wartości regulacyjnych kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz wartości tej dawki z punktu widzenia osiągnięć, sprawności ogólnej oraz zawartości składników w spalinach. Należy tu dodać, że omówione parametry regulacyjne są indywidualnie dobrane dla różnych stosowanych paliw i systemów zasilania (opisanych we wstępie przypadków a, b, c, d).

Blizsza analiza przedstawionych charakterystyk prowadzi do następujących spostrzeżeń:

- w każdym z opisanych przypadków zasilania silnika dwupaliwowego (a, b, c, d – rozdz. 1) możliwe jest uzyskanie porównywalnego lub większego maksymalnego momentu obrotowego w porównaniu do wersji standardowego zasilania jedynie olejem napędowym. Wartość tego momentu zależy wyraźnie od regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz od jej wartości. Dobór właściwej regulacji tych parametrów zależy od stosowanego systemu zasilania oraz od rodzaju paliwa głównego;
- wszystkie wersje silnika dwupaliwowego mogą charakteryzować się poprawą sprawności ogólnej (zmniejszenia jednostkowego zużycia energii) w obszarze pełnych obciążeń silnika (przy znacznym udziale paliwa głównego). Możliwość uzyskania poprawy sprawności ogólnej zależy także od przyjętych regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz od jej wartości;

- dla wszystkich wersji silnika dwupaliwowego istnieje możliwość doboru takich regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz jej wartości by silnik dwupaliwowy w porównaniu do wersji standardowej (zasilanej jedynie olejem napędowym) osiągał poprawę zarówno maksymalnego momentu obrotowego, jak i sprawności ogólnej.



Rys. 2. Porównanie charakterystyk obciążeniowych jednostkowego zużycia energii dla przypadków: a [2], c [3], b, d – badania własne (opis jak we wstępie)

Fig. 2. Comparison of load characteristics of the specific energy consumption for cases: a [2], c [3], b, d – own research (description as in the introduction)

3. Wyniki badań stężenia składników w spalinach

W trakcie sporządzania charakterystyk obciążeniowych jednostkowego zużycia energii dokonywano także pomiarów stężenia podstawowych składników w spalinach (CO, HC, NO_x), a także zadymienia spalin. Uzyskane wyniki przedstawione są w kolejnych rozdziałach.

Przyjęte przy sporządzaniu charakterystyki regulacje kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz jej wartości są takie same jak w przypadku sporządzania charakterystyk jednostkowego zużycia energii.

3.1. Porównanie stężenia CO w spalinach dla opisanych badanych wersji układu zasilania

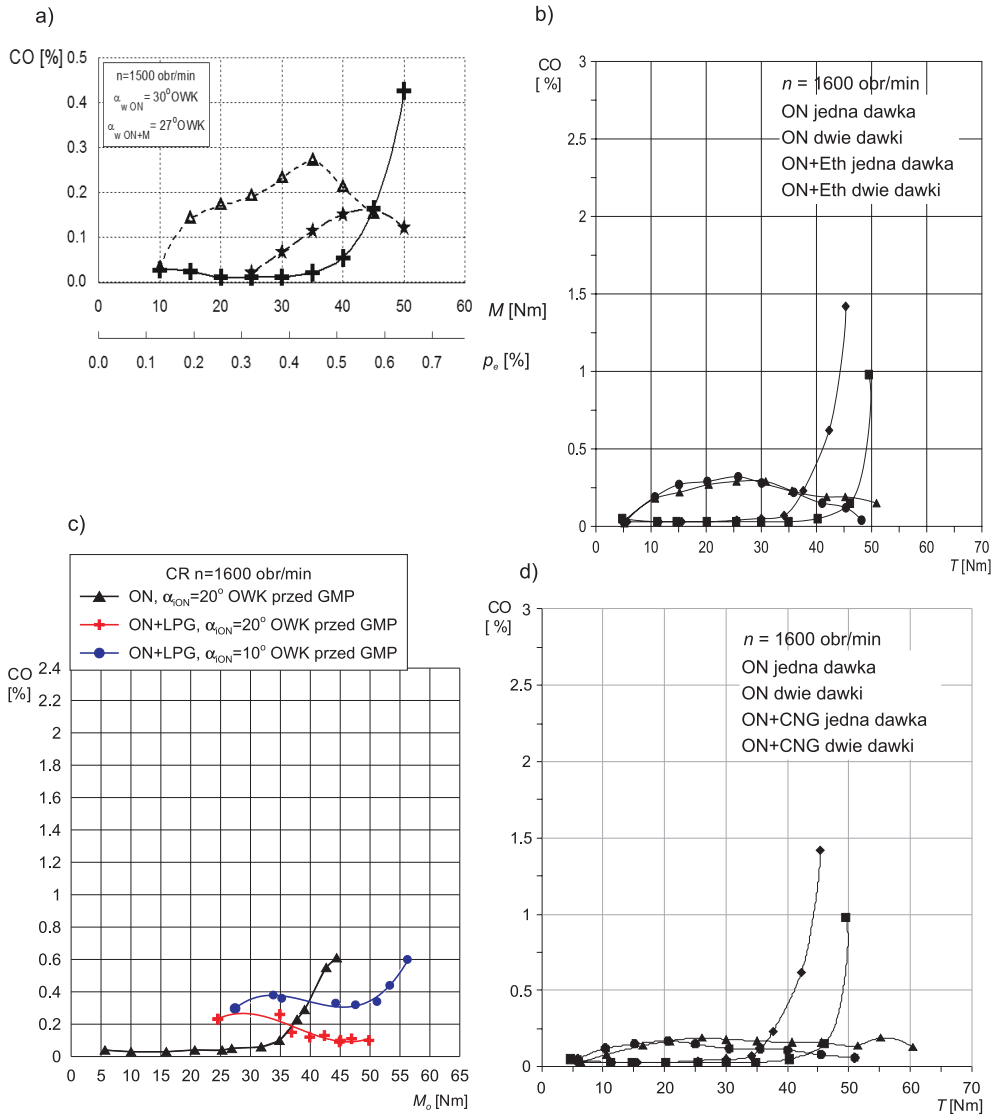
Poniżej przytoczono charakterystyki zmienności zawartości CO w funkcji obciążenia dla badanych wersji układów zasilania silnika.

Analiza zamieszczonych wyżej charakterystyk wykazuje, że dla każdego z przebadanych przypadków zasilania można zaobserwować, że dla obciążeń częściowych występuje wzrost stężenia CO w spalinach silnika dwupaliwowego w porównaniu z wersją zasilaną standardowo oraz zmniejszenie zawartości tego składnika dla obciążeń zbliżonych do maksymalnych. Należy dodać, że stężenia CO w spalinach silnika dwupaliwowego wyraźnie zależy także od wartości inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz przyjętej regulacji kąta wyprzedzenia jej wtrysku.

3.2. Porównanie stężenia HC w spalinach dla opisanych badanych wersji układu zasilania

Poniżej przytoczono charakterystyki zmienności stężenia HC w funkcji obciążenia dla badanych wersji układów zasilania silnika.

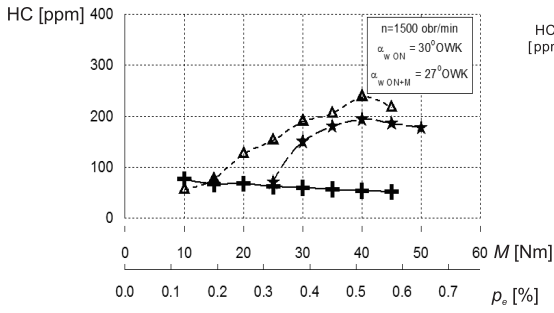
Analiza przedstawionych na rys. 4 charakterystyk wykazuje, że dla każdego z badanych przypadków stosowanego układu zasilania silnika dwupaliwowego głównie w zakresie obciążeń częściowych obserwuje się wzrost zawartości HC w spalinach w porównaniu z wersją standardowo zasilaną jedynie olejem napędowym. Jednocześnie wraz ze wzrostem obciążenia do obszaru zbliżonego do maksymalnego stężenia HC w spalinach silnika dwupaliwowego spada i zbliża się do wartości charakterystycznych dla przypadku zasilania standardowego. Należy tu także zauważyć silną zależność stężenia HC w spalinach silnika dwupaliwowego od wartości inicjującej zapłon dawki oleju napędowego, a także od wartości kąta wyprzedzenia wtrysku tej dawki.



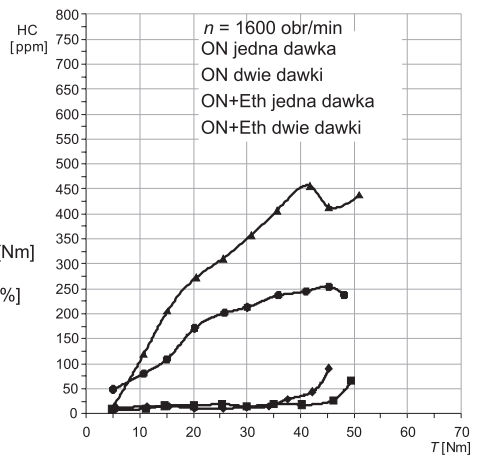
Rys. 3. Porównanie stężenia CO w spalinach dla przypadków: a [2], c [3], b, d – badania własne (opis jak we wstępie)

Fig. 3. Comparison of CO concentrations in the exhaust gas for cases: a [2], c [3], b, d – own research (description as in the introduction)

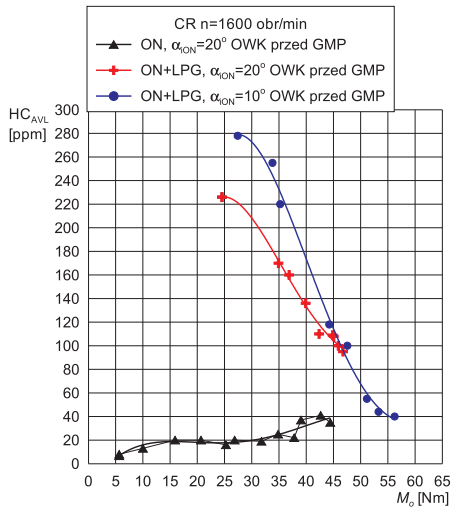
a)



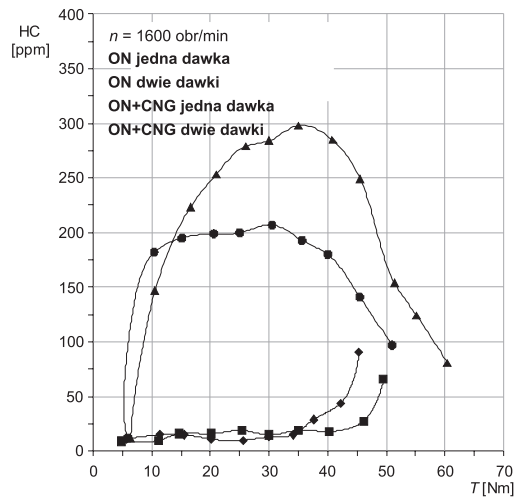
b)



c)



d)



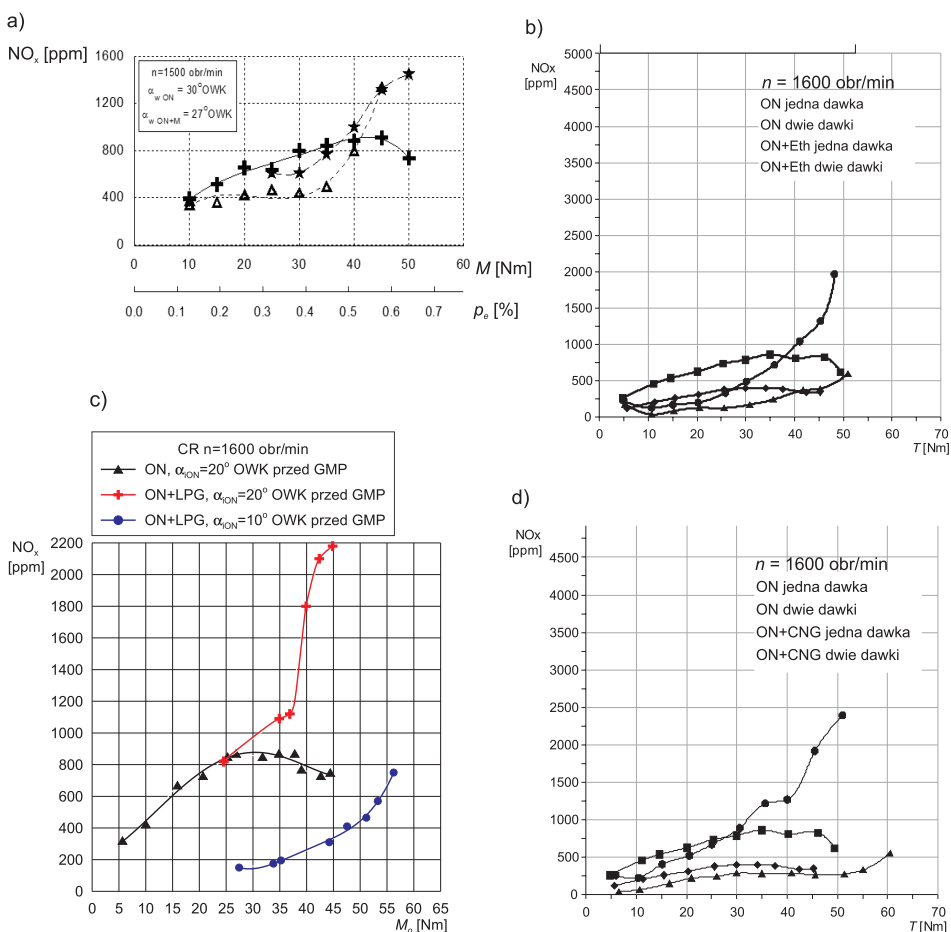
Rys. 4. Porównanie stężenia HC w spalinach dla przypadków: a [2], c [3], b, d – badania własne (opis jak we wstępie)

Fig. 4. Comparison of HC concentrations in the exhaust gas for cases: a [2], c [3], b, d – own research (description as in the introduction)

3.3. Porównanie stężenia NO_x w spalinach dla opisanych badanych wersji układu zasilania

Charakterystyki zmienności stężenia NO_x w funkcji obciążenia przedstawiono na rys. 5.

Analiza zamieszczonych na rys. 5 charakterystyk wykazuje, że stężenie NO_x w spalinach silnika dwupaliwowego jest mniejsza w obszarze obciążeń częściowych i wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia silnika. Przy porównaniu przebiegów tych charakterystyk z charakterystykami uzyskanymi podczas badań silnika zasilanego standardowo jedynie olejem napędowym dla większości przypadków regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz jej wartości, obserwuje się mniejszą zawartość NO_x w spalinach silnika dwupaliwowego przy obciążeniach częściowych i wzrost stężenia tego w obszarze obciążeń zbliżonych do maksymalnych. Należy tu dodać, że stężenie NO_x w spalinach silnika dwupaliwowego silnie zależy od przyjętej regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz od wartości tej dawki.

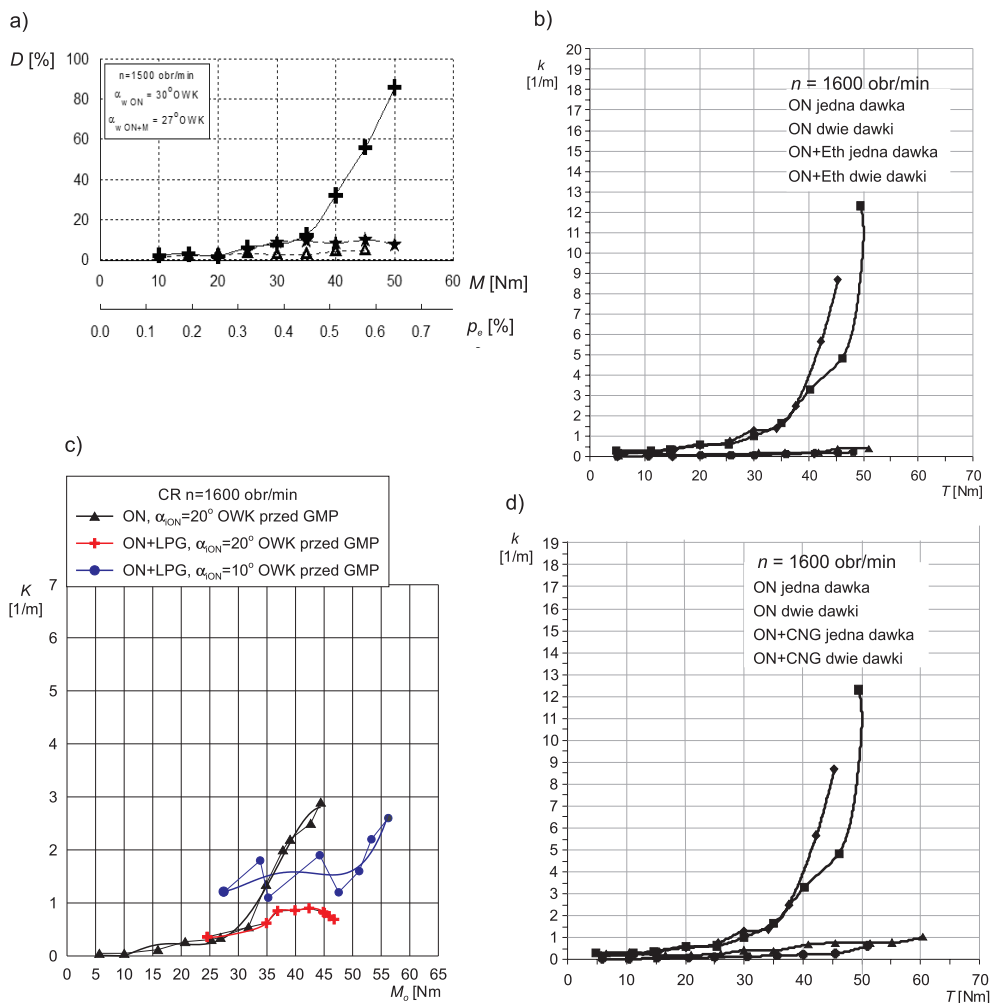


Rys. 5. Porównanie stężenia NO_x w spalinach dla przypadków: a [2], c [3], b, d – badania własne (opis jak we wstępie)

Fig. 5. Comparison of NO_x concentrations in the exhaust gas for cases: a [2], c [3], b, d – own research (description as in the introduction)

3.4. Porównanie zadymienia spalin dla opisanych badanych wersji układu zasilania

Charakterystyki zmienności współczynnika zadymienia spalin przedstawiono na rys. 6. Wszystkie zamieszczone poniżej charakterystyki wykazują, że przy małych obciążeniach silnika zasilanego dwupaliwowo zadymienie spalin jest porównywalny z przypadkiem zasilania standardowego. Wraz ze wzrostem obciążenia do obszaru zbliżonego do maksymalnego obserwuje się wyraźny spadek zadymienia spalin dla silnika dwupaliwowego



Rys. 6. Porównanie charakterystyki zadymienia spalin dla przypadków: a [2], c [3], b, d – badania własne (opis jak we wstępie)

Fig. 6. Comparison of smoke level for cases: a [2], c [3], b, d – own research (description as in the introduction)

4. Podsumowanie wyników badań stężenia składników w spalinach

Zmniejszenie emisji CO w zakresie dużych obciążeń silnika dwupaliwowego świadczy o poprawnym przebiegu procesu spalania. Jest to także potwierdzone zmniejszeniem jednostkowego zużycia energii (poprawą sprawności ogólnej silnika) (patrz wyniki i podsumowanie – rozdz. 2). Nieznaczny wzrost emisji CO w zakresie obciążeń częściowych dla przypadku zasilania dwupaliwowego może wynikać z faktu niecałkowitego spalania bardzo ubogiej ($\lambda > 10$) mieszaniny powietrza i paliwa głównego w obszarach komory spalania nieobjętych płomieniem od strugi wtryskiwanej dawki inicjującej. Wzbogacenie tej mieszaniny w obszarze obciążeń zbliżonych do maksymalnych skutkuje wg interpretacji autorów podjęciem procesu spalania w omawianej części komory spalania, a zatem spadkiem emisji CO oraz zmniejszeniem jednostkowego zużycia energii ge^* (poprawę sprawności ogólnej).

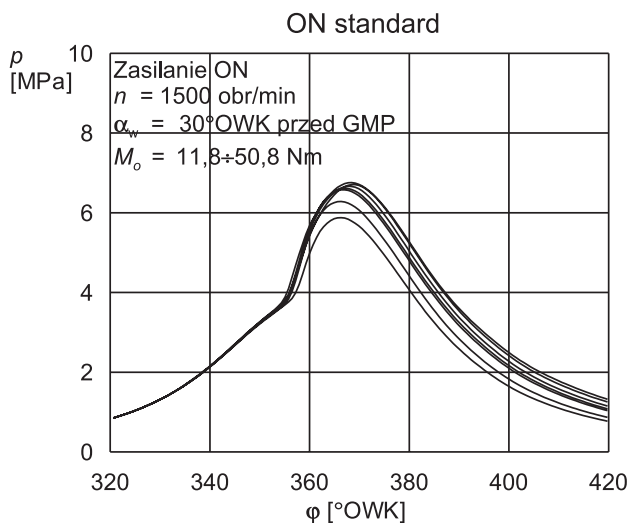
Analiza porównawcza charakterystyk emisji węglowodorów wykazuje wyraźny wzrost emisji tego składnika dla przypadku zasilania dwupaliwowego w obszarze obciążeń częściowych i jej spadek do poziomu charakterystycznego dla silnika zasilanego standardowo olejem napędowym w obszarze obciążeń zbliżonych do maksymalnych. Wydaje się, że tak jak i w przypadku emisji CO za zjawisko to odpowiada niecałkowite spalanie bardzo ubogiej mieszaniny paliwa głównego i powietrza poza obszarem płonącej strugi inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. Za taką interpretacją przemawiają także charakterystyki jednostkowego zużycia energii ge^* (rozdz. 2). Pamiętać należy że wraz ze wzrostem obciążenia silnika wyraźnemu wzbogaceniu ulega mieszanina paliwa głównego i powietrza, co skutkuje utrudnionym dostępem tlenu do drobin oleju napędowego i w konsekwencji pogorszeniem procesu spalania tego paliwa.

Analiza porównawcza charakterystyki emisji tlenków azotu prowadzi do spostrzeżenia, że w obszarze wyższych obciążeń silnika dwupaliwowego (charakteryzującym się poprawą zarówno sprawności ogólnej oraz momentu obrotowego) wzrasta emisja tych związków. Jest to efekt wzrostu obciążenia silnika dwupaliwowego (w efekcie wzrostu ciśnienia i temperatury w procesie spalania).

W każdym z analizowanych przypadków zasilania obserwuje się wyraźne zmniejszenie zadymienia spalin w obszarze pełnych obciążeń silnika dwupaliwowego. Jest to cecha charakterystyczna dla przypadku stosowania paliw gazowych oraz alkoholu.

5. Wstępna analiza przebiegu procesu spalania

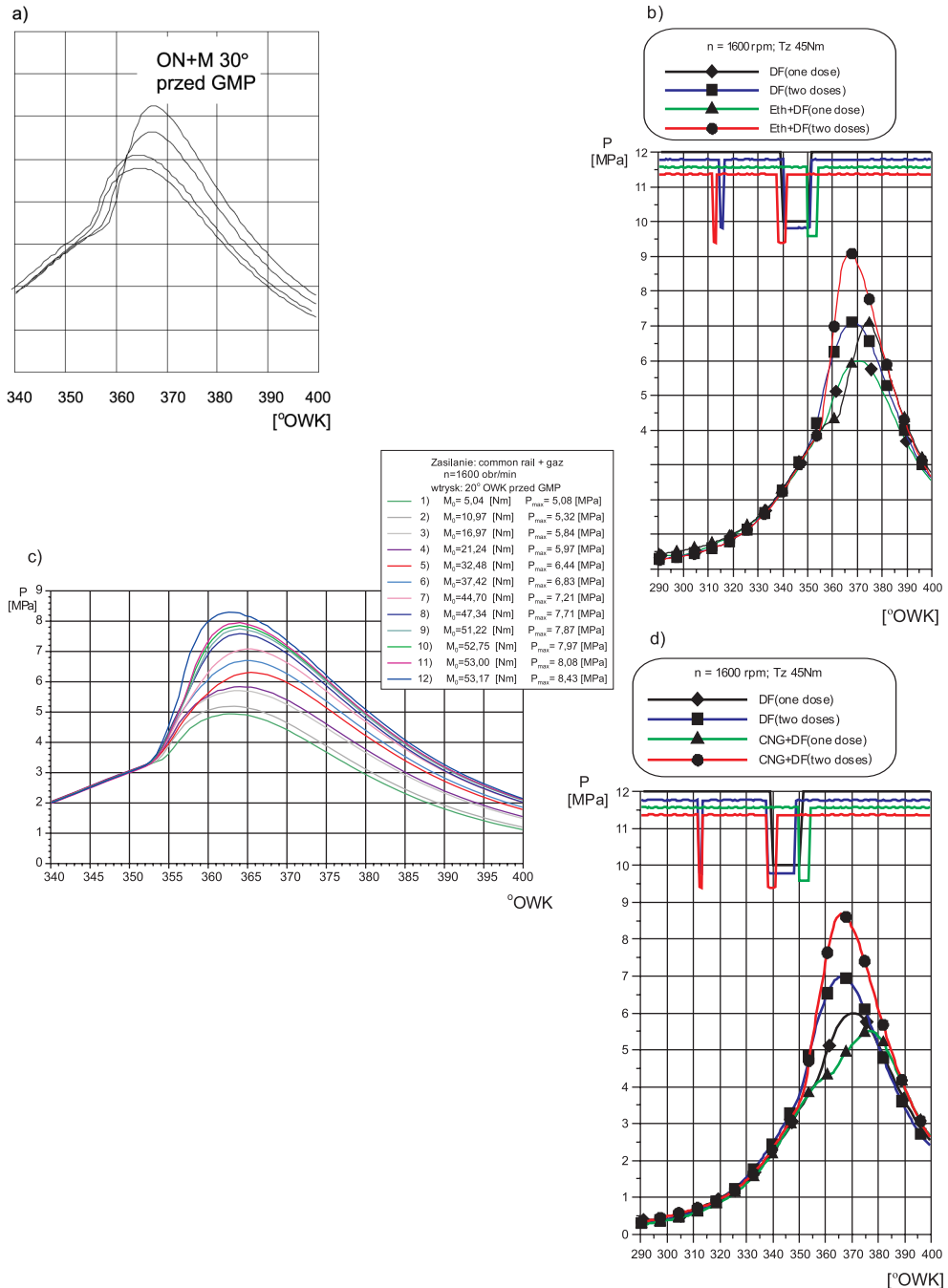
W trakcie sporządzania charakterystyk obciążeniowych dla kolejnych ustalonych obciążeń silnika rejestrowano po kilkadziesiąt cykli przebiegu ciśnienia (p) w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego φ [$^{\circ}$ OWK]. Rejestracje te przeprowadzono dla wszystkich omówionych przypadków stosowanego paliwa w silniku dwupaliwowym, a także dla przypadku standardowego układu zasilania jedynie olejem napędowym, wyniki zestawiona na rys. 8.



Rys. 7. Przebiegi ciśnień w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla silnika zasilanego ON

Fig. 7. Combustion pressure in the combustion chamber versus the crankshaft angle for an engine operation on DF

Analiza przebiegów ciśnień przy podobnym poziomie obciążeń ($M = 45$ Nm) dla każdego z przypadków zasilania prowadzi do wniosku, że zasilanie dwupaliwowemu towarzyszy większa szybkość narastania ciśnienia w procesie spalania oraz większe wartości osiąganego maksymalnego ciśnienia. Wartości te silnie zależą od regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującego zapłon dawki oleju napędowego, ale także od innych parametrów regulacyjnych (jak wartość tej dawki, oraz jej podziału). Zjawisko to niekorzystnie wpływa obciążenia mechaniczne i termiczne elementów silnika a także na wspomnianą wcześniej emisję tlenków azotu. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że w silniku dwupaliwowym o stopniu sprężania charakterystycznym dla silnika o zapłonie samoczynnym sprężana jest mieszanina powietrza i paliwa głównego. Jest ona podatna zarówno na występowanie przedwczesnych samozapłonów, jak i na spalanie stukowe już po inicjacji procesu spalania. Znane są wyniki badań opisujące to zjawisko [1]. Jednym ze sposobów dotychczas stosowanych na odsunięcie niebezpieczeństwa występowania spalania stukowego jest opóźnienie momentu wtrysku dawki inicjującej oleju napędowego (opóźnienie momentu zapłonu mieszaniny powietrza i paliwa głównego) sposób ten, choć skuteczny, nie jest najbardziej korzystny gdyż towarzyszy jemu przesunięcie procesu spalania w kierunku suwu rozprężania, co częstokroć prowadzi do obniżenia sprawności, wzrostu temperatury spalin itp. Innym przewidywanym możliwym sposobem odsunięcia tego zjawiska jest regulacja stopnia sprężania (podobnie jak w silnikach o zapłonie iskrowym). W dalszej części badań przewidziane jest przebadanie wpływu zmian stopnia sprężania w silniku dwupaliwowym na jego podstawowe parametry robocze, poziom emisji oraz przebiegi charakterystyk procesu spalania.



Rys. 8. Uśrednione przebiegi ciśnień w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla przypadków: a [2], c [3], b, d – badania własne (opis jak we wstępie)

Fig. 8. Mean combustion pressure in the combustion chamber versus the crankshaft angle for cases: a [2], c [3], b, d – own research (description as in the introduction)

6. Wnioski

6.1. Wnioski dotyczące osiągnięć

Dla wszystkich wersji silnika dwupaliwowego istnieje możliwość doboru takich regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego oraz jej wartości by silnik dwupaliwowy w porównaniu do wersji standardowej (zasilanej jedynie olejem napędowym) osiągał poprawę zarówno maksymalnego momentu obrotowego jak i sprawności ogólnej.

6.2. Wnioski dotyczące zawartości składników w spalinach

- dla wszystkich rodzajów zasilania silnika dwupaliwowego obserwuje się wzrost stężenia CO w zakresie obciążeń częściowych i jego spadek poniżej poziomu charakterystycznego dla standardowego silnika w obszarze obciążeń maksymalnych;
- wzrost zawartości HC w zakresie obciążeń częściowych i jego spadek dla przypadku zasilania CNG oraz etanolem) do poziomu charakterystycznego dla zasilania standardowego o obszarze obciążeń maksymalnych;
- spadek zawartości NO_x w zakresie obciążeń częściowych i jego wzrost powyżej poziomu charakterystycznego dla silnika zasilanego standardowo w zakresie obciążeń maksymalnych;
- wyraźne zmniejszenie zadymienia spalin dla każdego przypadku zasilania w porównaniu z zasilaniem standardowym ON.

6.3. Wnioski dotyczące analizy procesu spalania

Wstępna analiza procesu spalania wykazuje że spalaniu w silniku dwupaliwowym towarzyszy niebezpieczeństwo pojawienia się znacznej szybkości narastania ciśnienia oraz wzrost wartości ciśnienia maksymalnego. Zjawiska te prowadzą do wzrostu obciążeń cieplnych i mechanicznych, a także do wzrostu emisji NO_x. Wydaje się celowym przeanalizowanie wpływu stopnia sprężania na podstawowe parametry pracy silnika dwupaliwowego (podobnie jak ma to miejsce w silniku o ZI).

Literatura

- [1] Kozioł S., *Ocena trwałości układu tłokowo-korbowego silnika o ZS zasilanego głównie mieszaniną propanu i butanu*, rozprawa doktorska.
- [2] Luft S., *Studium silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego alkoholem metylowy*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Monografia Nr 29, 1997.
- [3] Luft S., *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym z wtryskiem ciekłego LPG do kolektora dolotowego*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Monografia Nr 54, Radom 2002.
- [4] Stelmasiak Z., *Wpływ niektórych parametrów regulacyjnych na osiągi dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego gazem ziemnym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Nr 155, Mechanika Nr 25, Częstochowa 2003.
- [5] Stelmasiak Z., *Studium procesu spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym*, praca habilitacyjna, Wydawnictwo ATH, Bielsko-Biała 2003.