



**Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki**

**Wydział Mechaniczny
Instytut Pojazdów Samochodowych
i Silników Spalinowych
Zakład Silników z Zapłonem Iskrowym**

Michał Mareczek

**Sprawność i toksyczność spalin silnika
z zapłonem iskrowym zasilanego ubogą mieszanką
propanu-butanu z powietrzem i wyposażonego
w reaktor magazynujący tlenki azotu**

Rozprawa doktorska

**Promotor:
Prof. dr hab. inż. Kazimierz Golec**

Kraków 2007



Panu Profesorowi dr. hab. inż.
Kazimierzowi Golcowi składam podziękowanie
za cenne wskazówki i rady.

*Dr. inż. Tadeuszowi Papudze,
mgr. inż. Adamowi Kobiałce
oraz pozostałym Pracownikom Zakładu Silników
z Zapłonem Iskrowym Politechniki Krakowskiej,
za życzliwość i wsparcie serdecznie dziękuję.*

Spis treści

Symbole i oznaczenia	1
1. Wstęp	3
2. Nowoczesne sposoby zmniejszania zużycia paliwa w silnikach ZI	8
2.1. Bezpośredni wtrysk benzyny – GDI (Gasoline Direct Injection)	11
2.2. Kontrolowany samozapłon - CAI (Controlled Auto Ignition)	14
2.3. Zmienny przepływ ładunku - VCM (Variable Charge Motion)	16
2.4. Zmienne sterowanie ruchem zaworów - VVA (Variable Valve Actuation)	
Zmienne fazy rozrządu - VVT (Variable Valve Timing)	17
2.5. Turbodoładowanie	25
2.6. Zmienny stopień sprężania - VCR (Variable Compression Ratio)	27
2.7. Zmienna objętość skokowa silnika - VD (Variable Displacement)	28
3. Sposoby zmniejszania emisji tlenków azotu w silnikach spalinowych	32
3.1. Metody obniżania emisji tlenków azotu w procesie obróbki spalin	33
3.2. Nieselektywna katalityczna redukcja tlenków azotu (NSCR – Non Selective Catalytic Reduction)	33
3.3. Selektowna niekatalityczna redukcja tlenków azotu (SNR – Selective Non Catalytic Reduction)	36
3.4. Selektowna katalityczna redukcja tlenków azotu (SCR – Selective Catalytic Reduction)	36
3.5. Selektowna katalityczna redukcja tlenków azotu (SCR – Selective Catalytic Reduction) z wykorzystaniem związków wodorowych	40
3.6. Katalityczny reaktor magazynujący tlenki azotu	42
4. Emisja toksycznych składników spalin w silniku pracującym na ubogiej mieszance paliwowo-powietrznej propanu-butanu	46
4.1. Porównanie charakterystyk silnika oraz układu oczyszczania spalin przy zasilaniu benzyną oraz propanem-butanem	46
5. Teza i cele pracy	51

6. Program badań doświadczalnych oraz stanowisko pomiarowe	54
6.1. Program badań doświadczalnych	
6.2. Stanowisko badawcze	55
6.2.1. Obiekt badań	56
6.2.2. Układ zasilania silnika	57
6.2.3. Układ wylotowy silnika	61
6.2.4. Hamulec silnikowy	64
6.2.5. Analizator spalin	64
6.2.6. Pomiar temperatury	66
6.2.7. Pomiar zużycia paliwa	67
6.2.8. Komputerowy System Sterowania (KSS) i archiwizacji danych	68
6.2.9. Sterownik silnika	73
7. Zastosowanie selektywnej katalitycznej redukcji (SCR) tlenków azotu w układzie wylotowym silnika z wykorzystaniem ciągłego wtrysku węglowodorów przed reaktor katalityczny	77
7.1. Badania z zastosowaniem reaktora zeolitowego	78
7.2. Badania z zastosowaniem reaktora magazynującego DeNO _x	82
8. Badania sprawności układu oczyszczania spalin z toksycznych związków przy zasilaniu silnika propanem-butanem przy zmiennej wartości współczynnika nadmiaru powietrza i zastosowaniu katalitycznego reaktora magazynującego	84
9. Porównanie działania katalitycznego reaktora magazynującego DeNO _x i katalitycznego reaktora trójfunkcyjnego pracujących w układzie wylotowym silnika zasilanego benzyną oraz propanem-butanem	98
10. Podsumowanie i wnioski	103
10.1. Wnioski z przeprowadzonych badań	104
11. Zakończenie	106
12. Bibliografia	107

Symbole i oznaczenia

CAI – kontrolowany samozapłon (Controlled Auto Ignition)
CNG – sprężony gaz ziemny (Compressed Natural Gas)
DeNO_x – katalityczny reaktor magazynujący tlenki azotu (Decomposition NO_x)
DGI – (GDI) bezpośredni wtrysk benzyny (Gasoline Direct Injection)
DI – wtrysk bezpośredni (Direct Injection)
DMP – dolny martwy punkt położenia tłoka
DSP – zmniejszanie średniej prędkości obrotowej silnika (Downspeeding)
DSZ – zmniejszanie objętości skokowej silnika (Downsizing)
ECU – sterownik silnika (Electronic Control Unit)
EGR – recyrkulacja spalin (Exhaust Gas Recirculation)
EMVT – elektromagnetyczne sterowanie zaworami (ElectroMagnetic Valve Timing)
eta – sprawność reaktora [%]
FID – analizator płomieniowo-jonizacyjny (Flame Ionisation Detector)
Ge – godzinowe zużycie paliwa [kg/h]
ge – jednostkowe zużycie paliwa [g/kWh]
GMP – górny martwy punkt położenia tłoka
HC – węglowodory (Hydrocarbons)
HCCI – samozapłon mieszanki homogenicznej (Homogenous Charge Compression Ignition)
KSS – komputerowy system sterowania
LAN – komputerowa sieć lokalna (Local Area Network)
LNG – skroplony gaz ziemny (Liquified Natural Gas)
LPG – skroplony propan-butan (Liquified Petroleum Gas)
Me – moment efektywny [Nm]
MPI – układ wielopunktowego wtrysku do kolektora dolotowego (MultiPoint Injection)
MV²T (MVVT) – system z mechaniczną, płynną regulacją ruchu zaworów
(Mechanically Variable Valve Train)
n – prędkość obrotowa silnika [obr/min]
NDIR – analizator niedyspersyjny na podczerwień (Non-Dispersive Infrared)
Ne – moc efektywna [kW]
NEDC – nowy europejski jezdny cykl testowy (New European Driving Cycle)
NO_x – tlenki azotu

NSCR – nieselektywna katalityczna redukcja (Non Selective Catalitic Reduction)

NVH – zjawisko wibracji i hałasu spowodowane pracą silnika (Noise Vibration Hardness)

PID – regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (Proportional Integral Derivative)

PM – cząstki stałe (Particulate Matter)

PMD – analizator paramagnetyczny (Paramagnetic Detector)

RS-232 – standard połączenia urządzeń przesyłających dane

SCR – selektywna katalityczna redukcja (Selective Catalytic Reduction)

SNR – selektywna niekatalityczna redukcja (Selective Noncatalytic Reduction)

TCP-IP – protokół transmisji danych (Transmission Control Protocol-Internet Protocol)

THC – wszystkie węglowodory (Total Hydrocarbons)

TWC – katalityczny reaktor trójdrożny (Three Way Catalytic Converter)

VCM – zmienny przepływ ładunku (Variable Charge Motion)

VCR – zmienny stopień sprężania (Variable Compression Ratio)

VD – zmienna objętość skokowa silnika (Variable Displacement)

VLS-D – system odłączający cylindry (Variable Lift System – Deactivation)

VLS-R – system ograniczający stopień otwarcia zaworów (Variable Lift System – Reduction)

VTG – turbosprężarka o zmiennej geometrii wlotu (Variable Turbine Geometry)

VVA – zmienne sterowanie ruchem zaworów (Variable Valve Actuation)

VVT – zmienne fazy rozrządu (Variable Valve Timing)

ZI – silnik z zapłonem iskrowym

ZS – silnik z zapłonem samoczynnym

λ – współczynnik nadmiaru powietrza

1. Wstęp

Kierunek rozwoju silników z zapłonem iskrowym (ZI) w znaczny sposób zmienił się w ciągu ostatnich lat. W przeszłości główny nacisk kładziono na rozwój rynku motoryzacyjnego i związane z tym wprowadzanie coraz to nowszych technologii, zwiększając różnorodność produktów. Aktualnie podstawowymi celami konstruktorów jest spełnianie przez silniki coraz bardziej surowych norm dotyczących emisji toksycznych składników spalin, oraz zmniejszanie zużycia paliwa i związanej z tym emisji dwutlenku węgla (CO_2 ma główny wpływ na efekt cieplarniany). Strategia taka wynika z faktu, że mimo usilnych starań zmniejszania zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery, ich poziom często przekracza maksymalne limity ustalone przez Światową Organizację Zdrowia (WHO). Normalnym już zjawiskiem jest powstawanie nad miastami smogu fotochemicznego, będącego efektem reakcji chemicznych pod wpływem promieniowania słonecznego. W większości krajów zostały administracyjnie ustalone limity ilości najbardziej szkodliwych związków, jakie mogą być emitowane przez pojazd do atmosfery. Związkami tymi są głównie:

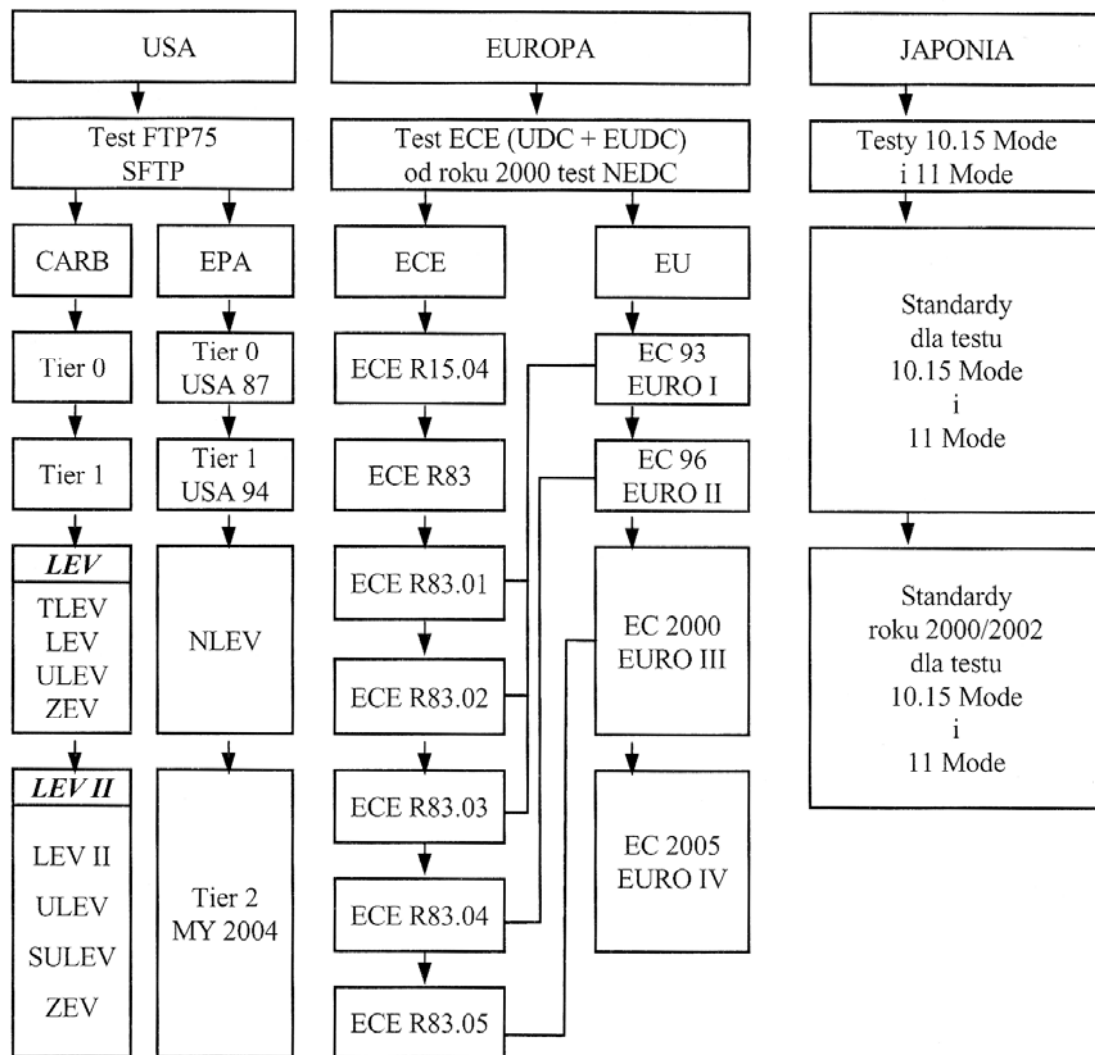
- węglowodory (hydrocarbons HC),
- tlenki azotu (NO_x głównie NO i NO_2),
- tlenek węgla (CO),
- dwutlenek węgla (CO_2)
- cząstki stałe (particulate matter PM).
- związki siarki (S)

Na świecie, najważniejszymi regulacjami prawnymi dotyczącymi ograniczenia szkodliwej emisji spalin samochodowych są (rys.1.1) :

- Przepisy USA , CAAA'90 (Clean Air Act Amendments)
 - Federalne – CFR (Code of Federal Regulations)
 - Kalifornijskie – CCR (California Code of Regulations)
- Przepisy Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ, regulamin ECE
- Przepisy Unii Europejskiej, dyrektywa EC
- Przepisy japońskie 10.15 i 11 Mode

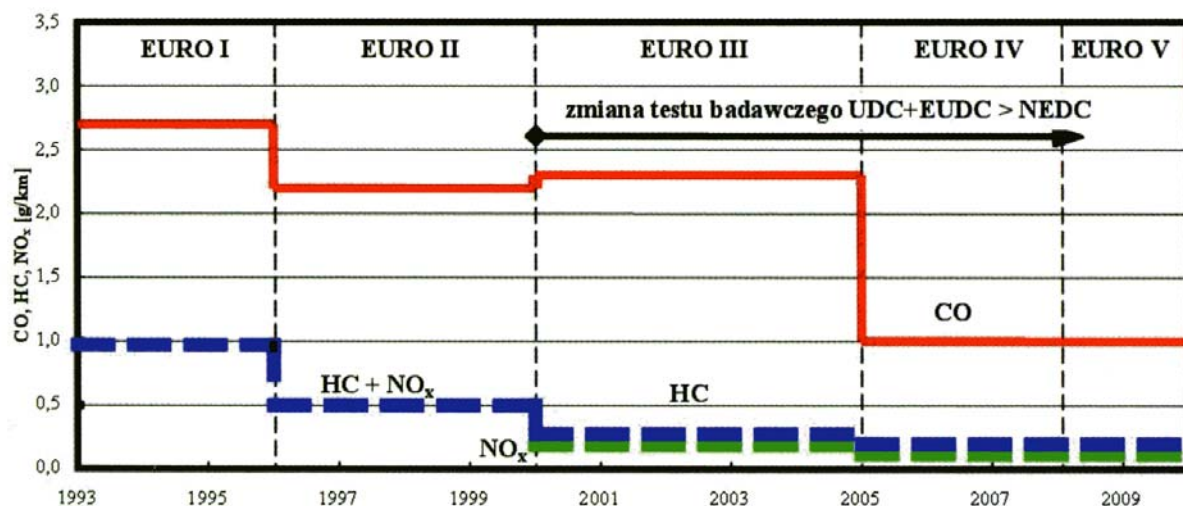
Spełnianie limitów emisji toksycznych składników spalin, zmniejszanych w kolejnych edycjach regulacji prawnych, stanowi spore wyzwanie dla producentów silników spalinowych (rys.1.2) [37].

W Kalifornii, w której po raz pierwszy zaczęto poważnie zastanawiać się nad zanieczyszczaniem środowiska przez motoryzację, wartości limitów, w zależności od grupy związków, zmniejszyły się w przeciągu ostatnich 50 lat od 18 razy dla tlenków azotu do 325 razy dla węglowodorów (rys.1.3).

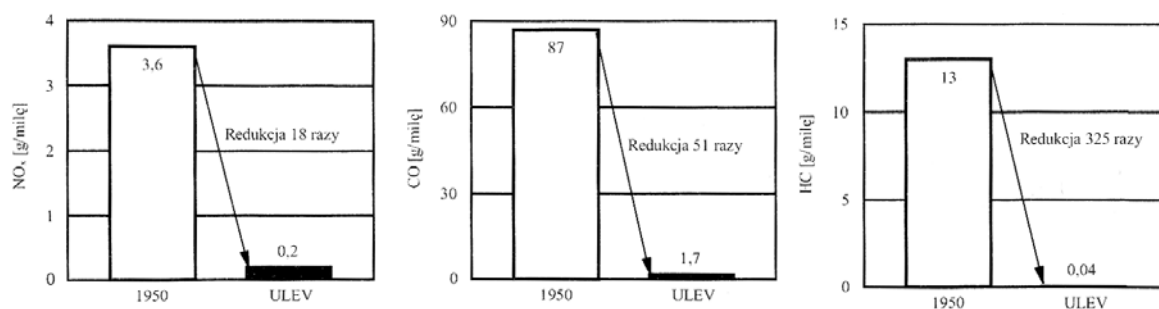


Rys.1.1. Obowiązujące w roku 2006 Przepisy dotyczące emisji toksycznych składników spalin [37].

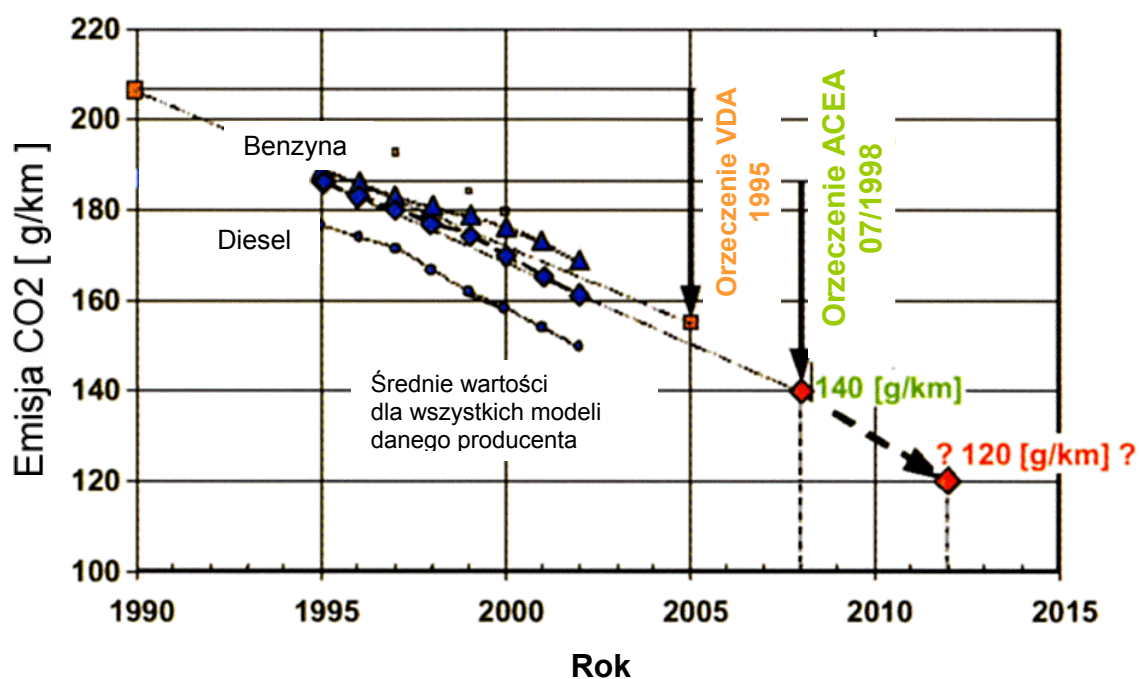
Coraz większy nacisk na zmniejszenie emisji dwutlenku węgla, a i z tym zmniejszenie zużycia paliwa powoduje, że od 2008 roku średni limit emisji CO₂ dla samochodów osobowych danego producenta będzie wynosił 140 g/km, a od 2012 r. - 120 g/km (rys.1.4).



Rys.1.2. Limity emisji związków toksycznych dla samochodów osobowych z silnikiem ZI przyjęte w krajach Uni Europejskiej[36].

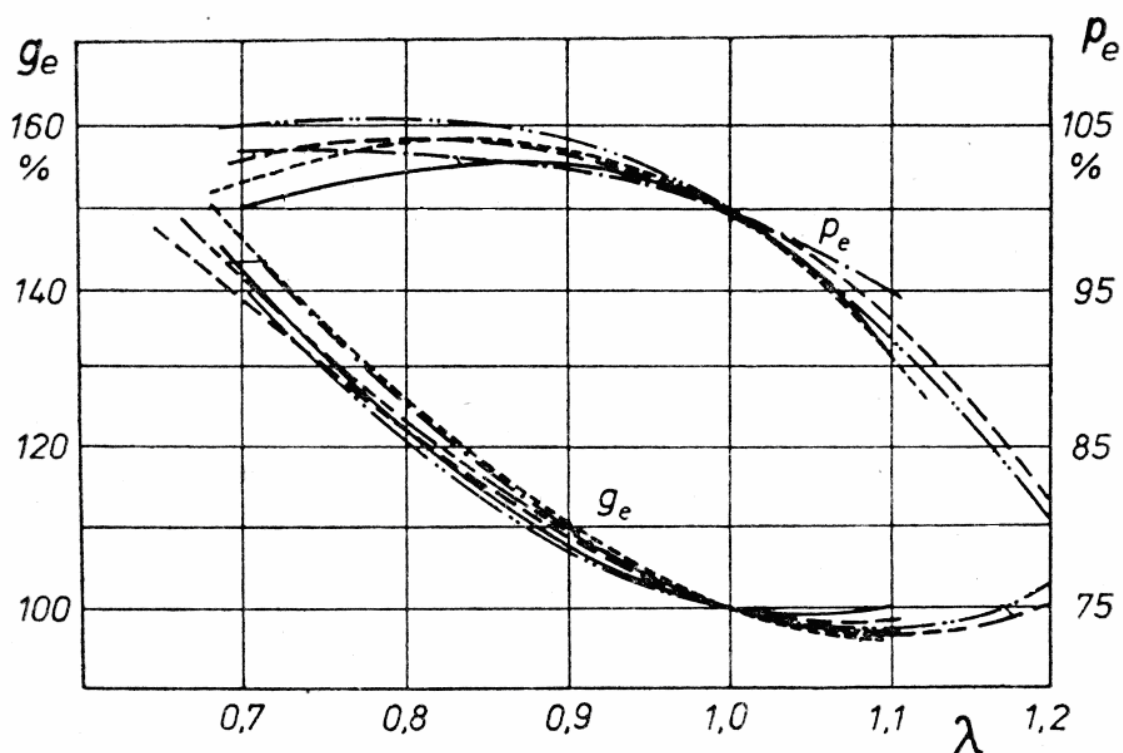


Rys.1.3. Zmiana limitów w przeciągu ostatnich 50 lat w normach Kalifornijskich [37].



Rys.1.4. Emisja CO₂ w Europie – trend [17].

Zużycie paliwa przez silnik związane jest z jego sprawnością ogólną. Największą sprawność w silniku z zapłonem iskrowym w przypadku mieszanki jednorodnej uzyskuje się przy zasilaniu mieszanką zubożoną o wartości współczynnika nadmiaru powietrza w przedziale $\lambda = 1.1 - 1.15$. Stosowanie takiej mieszanki uzasadnione jest przy częściowych obciążeniach silnika. W przypadku pełnego obciążenia wzbogacona mieszanka do ok. $\lambda = 0.95$ pozwala na uzyskanie największej mocy silnika (rys.1.5).

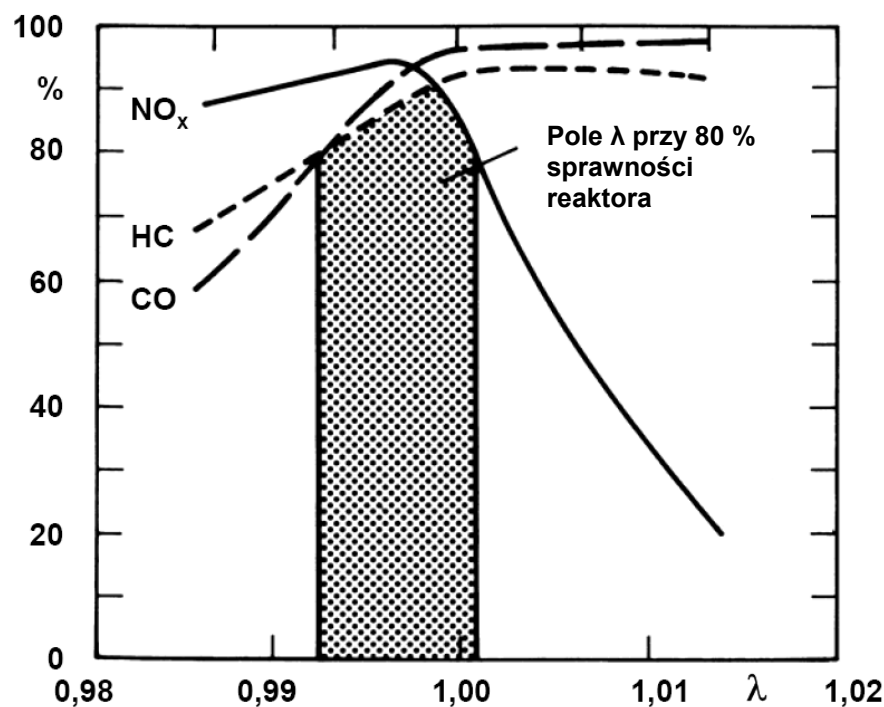


Rys. 1.5. Typowe charakterystyki regulacyjne wartości współczynnika nadmiaru powietrza dla silnika ZI [39].

Znaczne zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin uzyskuje się przez zastosowanie w silnikach reaktora katalitycznego trójfunkcyjnego (redukująco – utleniającego). Jednak jego skuteczne działanie wiąże się ze stosowaniem mieszanki o składzie bliskim stechiometrycznego. W przypadku zasilania mieszanką ubogą gwałtownie spada zdolność konwersji tlenków azotu przez reaktor katalityczny (Rys.1.6.)

Pojawienie się katalitycznych reaktorów magazynujących tlenki azotu otwiera nowe możliwości zwiększenia sprawności silników przy spełnieniu rosnących wymagań związanych z emisją toksycznych składników spalin. Możliwość magazynowania tlenków azotu występujących w spalinach bogatych w tlen, oraz ich redukcji w obecności produktów

niezupełnego spalania, pozwala na stosowanie zasilania mieszanką o wartości współczynnika nadmiaru powietrza odpowiadającej maksimum sprawności ogólnej silnika. W światowych ośrodkach naukowych problem zastosowania reaktorów DeNO_x (również tlenkowych i zeolitowych) podjęto w związku z możliwością redukcji tlenków azotu w silnikach z zapłonem samoczynnym (ZS) i w silnikach zasilanych benzyną przez wtrysk bezpośredni w warunkach jakościowej regulacji mocy i przy stosowaniu bardzo ubogich mieszanek (globalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda > 2$).



Rys.1.6. Sprawność konwersji trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego [42]

W przypadku silników zasilanych paliwem gazowym problem redukcji tlenków azotu przy zasilaniu mieszanką ubogą nabiera dodatkowej atrakcyjności ze względu na ekologiczne właściwości tych paliw oraz szersze niż dla benzyny granice zapalności.

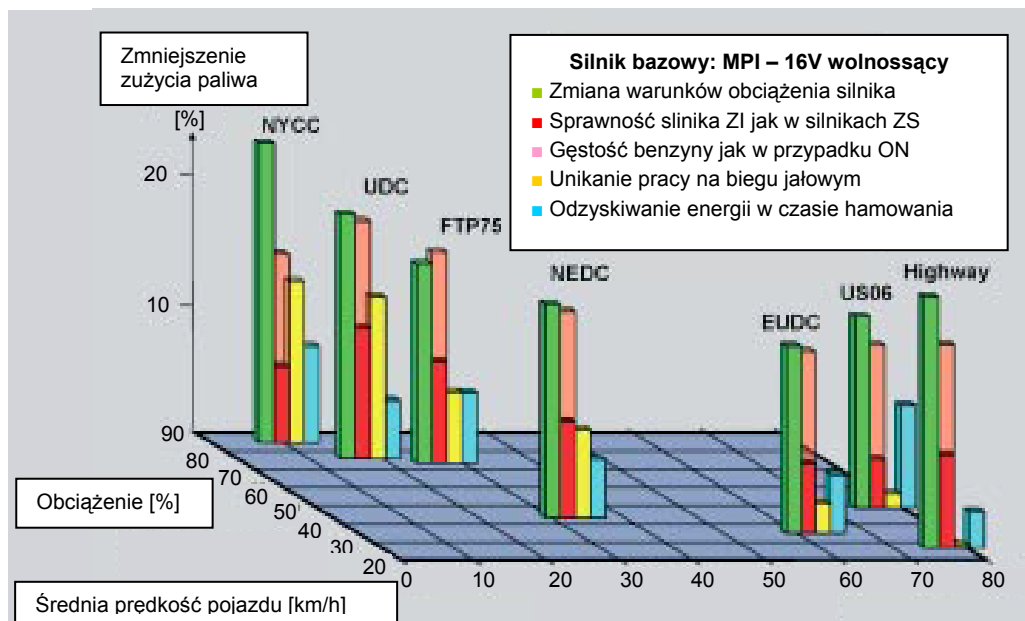
2. Nowoczesne sposoby zmniejszania zużycia paliwa w silnikach ZI

Zużycie paliwa przez silnik nie jest związane wyłącznie z warunkami ruchu pojazdu (np. testowe cykle jezdne), ale również z warunkami obciążenia silnika wynikającymi z masy samochodu, objętości skokowej silnika oraz charakterystyki przełożeń skrzyni biegów.

Różne sposoby stosowane w celu zmniejszenia zużycia paliwa, takie jak:

- zmiana warunków obciążenia silnika,
- zwiększenie sprawności silnika,
- unikanie pracy na biegu jałowym (start/stop),
- odzyskiwanie energii w czasie hamowania pojazdu,

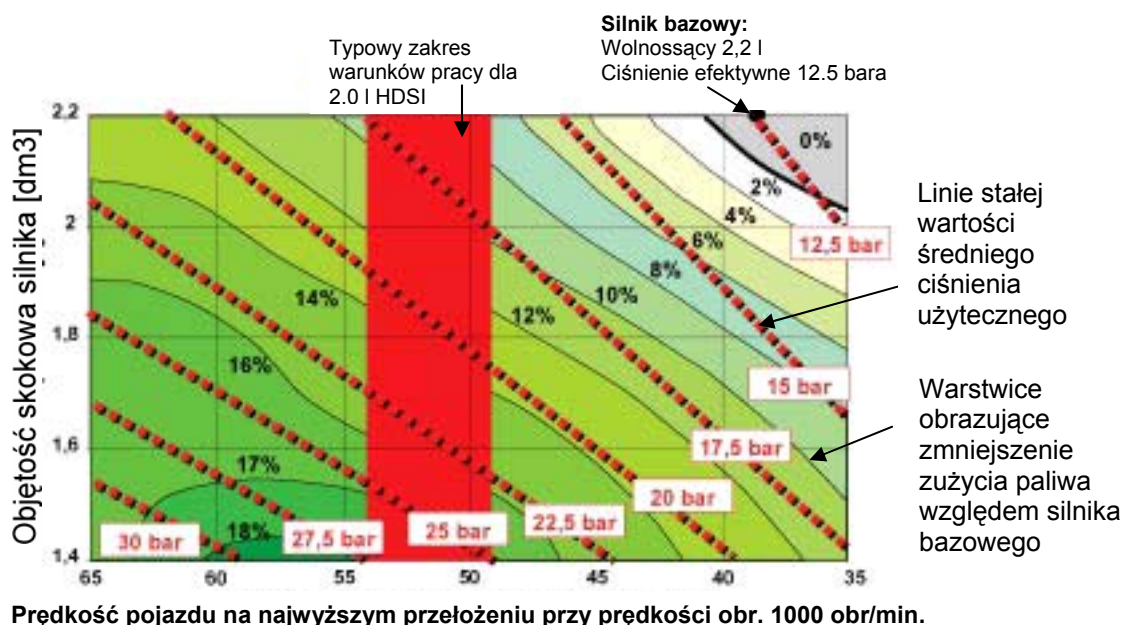
wykazują różną skuteczność w redukcji zużycia paliwa w zależności od cyklu jezdne. Widać to zwłaszcza w przypadku odzyskiwania energii z hamowania oraz trybu start/stop (Rys. 2.1).



Rys.2.1. Potencjalne oszczędności w zużyciu paliwa w różnych cyklach jezdnych [5].

Nawet gdyby sprawność silników ZI osiągnęła poziom sprawności obecnych silników ZS, wzrost oszczędności zużycia paliwa byłby stosunkowo niewielki, ok. 4 – 12 %. Wynika to z faktu, że mniejsze zużycie paliwa w silniku ZS zależy jedynie w 1/3 od większej sprawności ogólnej silnika. Pozostałe 2/3 oszczędności wynikają z mniejszej wartości przełożenia przekładni głównej oraz większej ilości ciepła uzyskanej ze spalania dm^3 oleju napędowego w porównaniu z benzyną [5].

Przesuwanie pola pracy silnika w obszary wyższej sprawności, czyli np. zmniejszenie objętości skokowej o 20% i zwiększenie przełożenia głównego w skrzyni biegów o 30 %, powoduje największe oszczędności paliwa niezależnie od profilu jazdy i obciążenia (Rys. 2.2). Wyraża się to w obecnie istniejącym trendzie zmniejszania objętości skokowej silników DSZ (downsizing) oraz zmniejszania prędkości obrotowej w czasie pracy DSP (downspeeding) [5, 21].



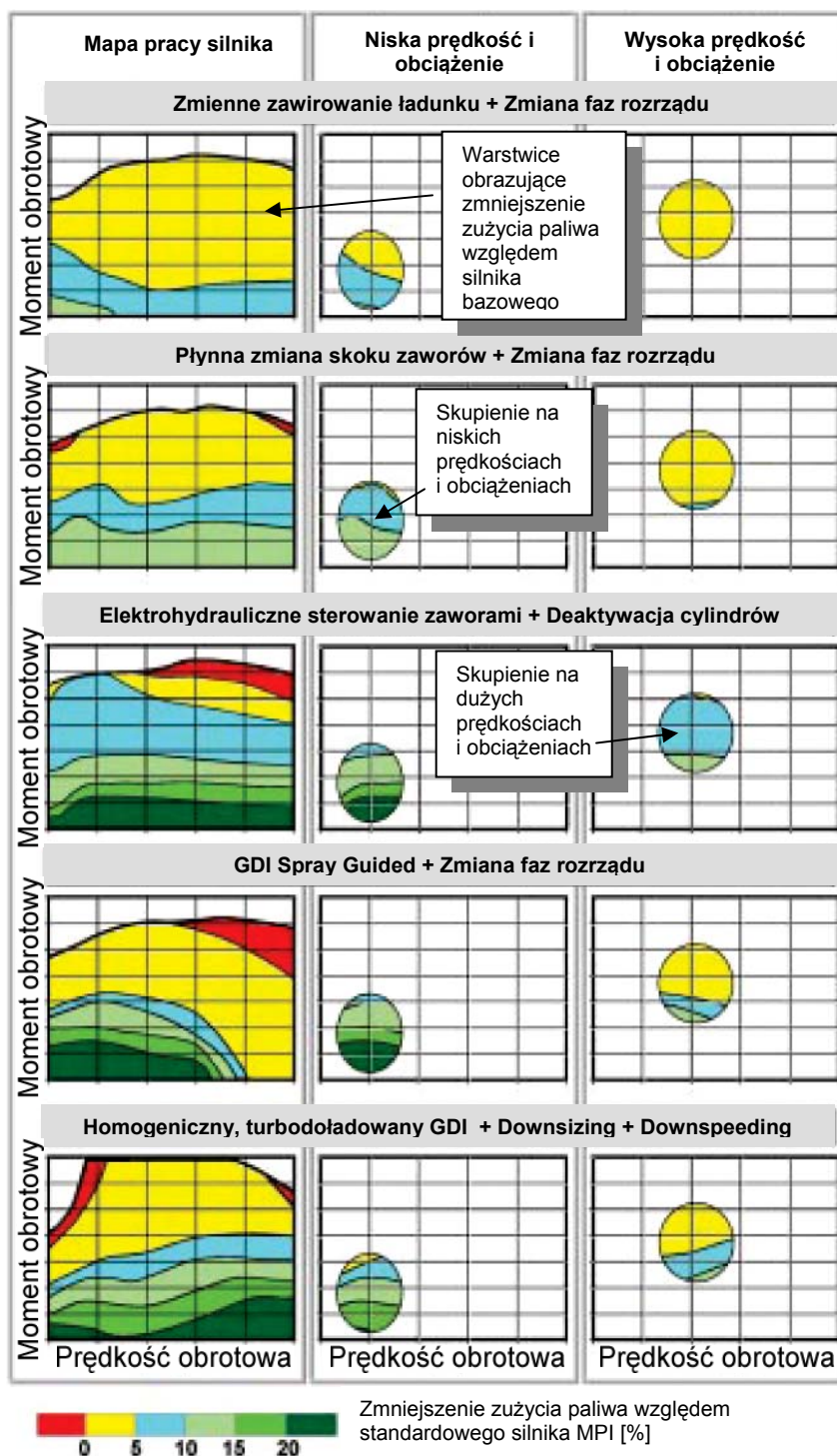
Rys.2.2. Zmniejszenie zużycia paliwa [%] w teście NEDC przez stosowanie downsizing'u i/lub zmniejszanie przełożenia głównego [5].

Obie te metody w jednakowy sposób wpływają na obniżenie zużycia paliwa. Zmniejszenie objętości skokowej i/lub zmniejszanie przełożenia głównego wpływa na zwiększenie średniego ciśnienia użytecznego przy określonej mocy na kołach, proporcjonalnej do prędkości pojazdu. Wraz ze wzrostem obciążenia silnika wzrasta jego sprawność.

Niemniej jednak badania silników były w ostatnich latach skupione szczególnie na procesie spalania i wymiany gazów w celu uzyskania większej sprawności ogólnej, zwłaszcza przy częściowych obciążeniach.

W przeciwieństwie do silników ZS, w przypadku których główny kierunek rozwoju jak np. wtrysk bezpośredni czy turbodoładowanie jest oczywisty, to w silniku ZI istnieje szereg sposobów obniżania zużycia paliwa, które różnią się efektywnością i kosztami produkcji silników realizujących te rozwiązania.

Na rys. 2.3 przedstawiono wpływ różnych systemów na zmniejszenie zużycie paliwa przez silnik, w porównaniu z obecnym standardem (silnik o czterech zaworach na cylinder, $\lambda = 1$, stałe fazy rozrządu). Mniej istotna jest wartość największej sprawności a bardziej istotna poprawa sprawności w tym obszarze obciążenia, który jest najczęściej wykorzystywany w rzeczywistych warunkach.



Rys.2.3. Potencjalne możliwości zmniejszenia zużycia paliwa w silnikach ZI [5].

Obecnie w fazie ciągłego rozwoju są następujące systemy prowadzące do zmniejszenia zużycia paliwa przez silniki ZI: [49]

- Bezpośredni wtrysk paliwa - GDI (DGI) (Gasoline Direct Injection) tworzący ładunek
 - Uwarstwiony
 - tworzony przez wir wspomagany oddziaływaniem ścianek - wall/air guided
 - tworzony przez strugę - spray guided
 - Homogeniczny
- Kontrolowany samozapłon - CAI / HCCI (Controlled Auto Ignition / Homogenous Charge Compression Ignition)
- Zmienny przepływ ładunku – VCM (Variable Charge Motion)
- Zmienne fazy rozrządu – VVT (Variable Valve Timing)
- Zmienne sterowanie zaworami - VVA (Variable Valve Actuation)
- Turbodoładowanie
- Zmienny stopień sprężania - VCR (Variable Compression Ratio)
- Zmienna objętość skokowa silnika - VD (Variable Displacement)

2.1. Bezpośredni wtrysk benzyny - GDI (Gasoline Direct Injection)

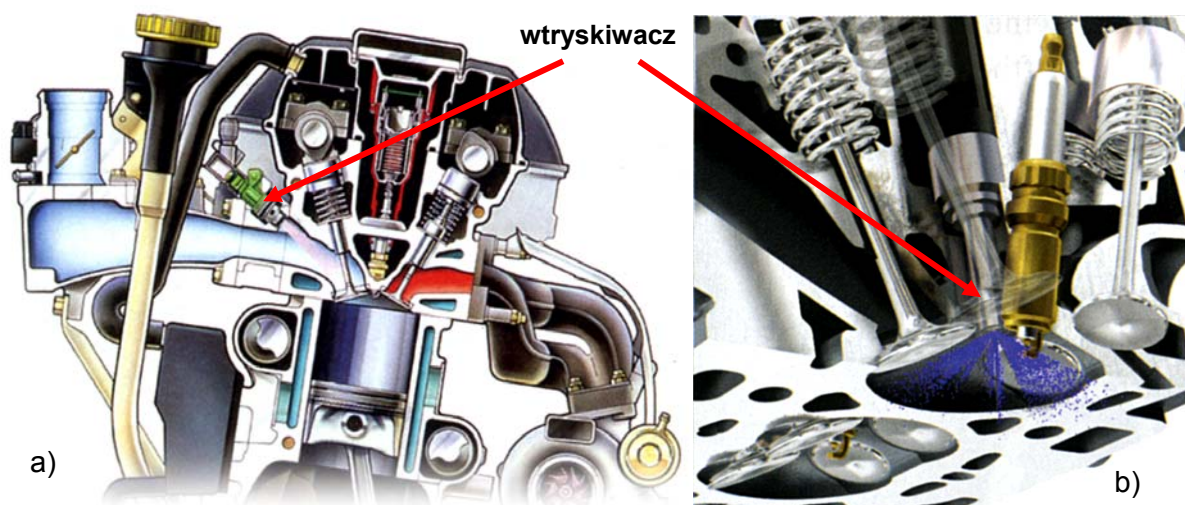
Pierwowzorem inicjującym rozwój współczesnych silników GDI był system wprowadzony w Japonii przez firmę Mitsubishi.

Idea wtrysku bezpośredniego polega na dawkowaniu paliwa bezpośrednio do wnętrza cylindra, w przeciwieństwie do obecnie najczęściej stosowanych systemów wtrysku pośredniego, w których paliwo dostarczane jest do układu dolotowego przed zaworem dolotowym (rys.2.4).

System bezpośredniego wtrysku paliwa daje możliwość tworzenia mieszanki homogenicznej albo uwarstwionej. W czasie pracy na mieszance homogenicznej wtrysk paliwa następuje w czasie suwu dolotu, co pozwala na dokładne wymieszanie paliwa z powietrzem.

Pierwszym impulsem do rozwoju wtrysku bezpośredniego była możliwość zwiększenia sprawności napełniania oraz zmniejszenie skłonności do spalania stukowego, w porównaniu z wtryskiem pośrednim. W połączeniu z wysokociśnieniowym układem wtrysku paliwa pozwala on na zmniejszenie emisji węglowodorów w fazie nagrzewania silnika. Przez odpowiednią strategię sterowania wtryskiem bezpośrednim umożliwia też szybkie

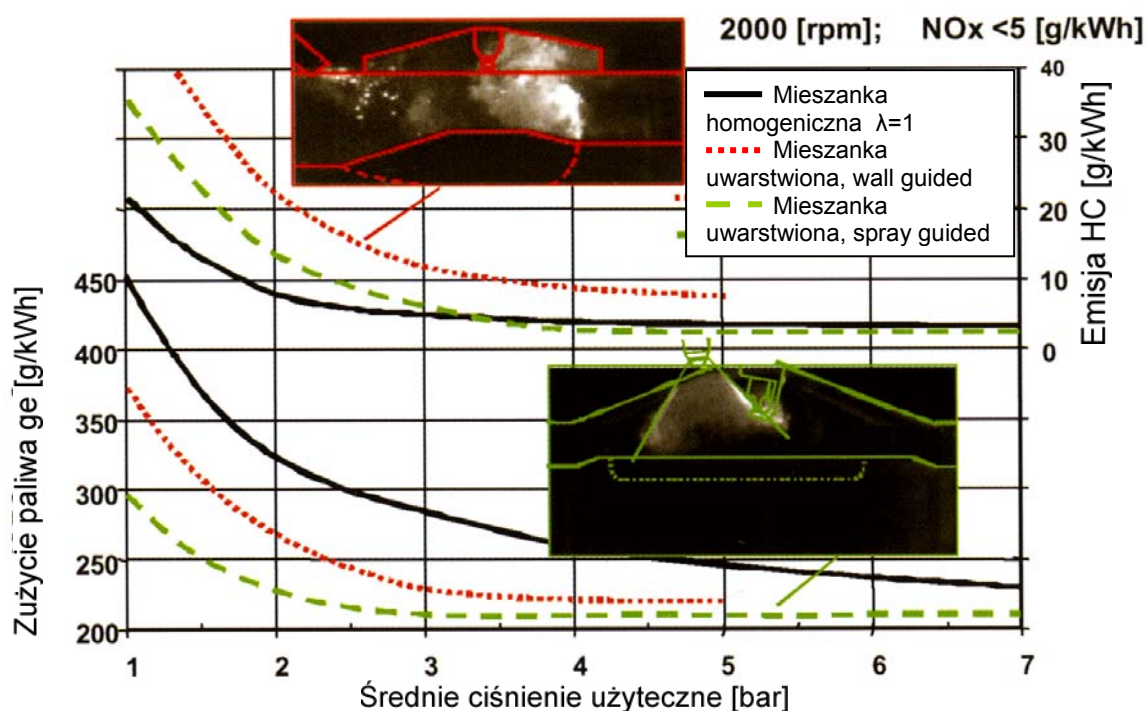
nagrzewanie reaktora katalitycznego i związane z tym znaczne zmniejszenie emitowanych w spalinach zanieczyszczeń.



Rys.2.4. Rozwiązanie wtrysku pośredniego a) i bezpośredniego b).

W przypadku systemów I-szej generacji, tworzących mieszkankę uwarstwioną często wykorzystywano istniejące rozwiązania bazujące na układach MPI (Multi Point Injection). Ze względów technologicznych, wtryskiwacz umiejscowiony był w bocznej ścianie komory spalania z dala od świecy zapłonowej. Rozwiązanie takie jest niekorzystne z punktu widzenia procesów tworzenia mieszanki. Uzyskanie uwarstwienia ładunku wymaga wspomagania zawirowania przez odpowiednie ukształtowanie kanału dolotowego i denka tłoka (wall/air guided). Wtrysk paliwa następuje pod koniec suwu sprężania.

Początkowo nie doceniono złożoności systemu oraz wymagań dotyczących jego dalszego rozwoju. Spowodowało to opóźnione wprowadzenie na rynek silników z wtryskiem bezpośrednim oraz stosunkowo niewielkie obniżenie zużycia paliwa w zakresie 5 do 12 % w teście NEDC. Chociaż oceniano potencjalne możliwości obniżenia zużycia paliwa w tym systemie o 20 - 25 %, to nie widziano rozwiązań, które by jednocześnie spełniły ostre normy EURO 4 czy ULEV. Obecnie sytuacja radykalnie się zmieniła przez pojawienie się reaktorów DeNO_x, sond do pomiaru stężenia tlenków azotu oraz odpowiednie sterowanie silnikiem. Kolejnym krokiem jest wprowadzenie systemów II-giej generacji, w których mieszanka tworzy się w strudze wtryskiwanego paliwa (spray guided) [53] (rys.2.5). Bardziej zwarta chmura mieszanki powoduje mniejszą emisję węglowodorów i tlenków azotu, a odpowiednio opóźnione spalanie zmniejsza straty na ściankach skutkując zmniejszeniem zużycia paliwa.



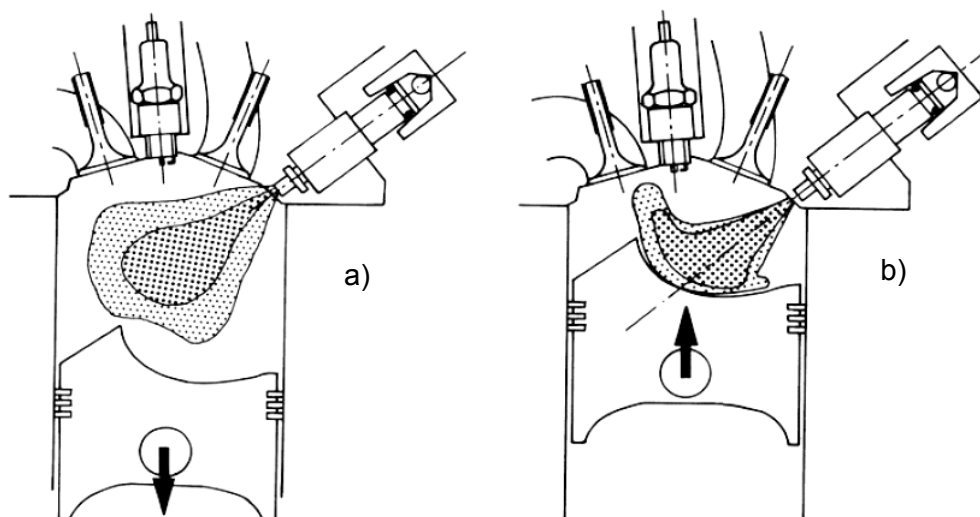
Rys.2.5. Porównanie jednostkowego zużycia paliwa i emisji węglowodorów w systemach GDI wall guided (linia czerwona) oraz spray guided (linia zielona) [17].

Niewielki odstęp między wtryskiwaczem a świecą pozwala uzyskać doskonałą zdolność do uwarstwiania i poprawić zużycie paliwa w porównaniu ze wspomnianymi układami I-szej generacji. Prognozować można, że w tym systemie można osiągnąć 5 % zmniejszenie zużycia paliwa i ok. 30 % zmniejszenie emisji HC w porównaniu z układami formującymi ładunek przez wir wspomagany ściankami komory spalania.

Duży nacisk położony jest na odpowiednie rozpylacze paliwa, które precyzyjnie utrzymują kształt i kąt rozpylonej strugi niezależnie od warunków pracy silnika. Obecnie dobrze do tych celów nadają się wtryskiwacze piezoelektryczne [35, 1].

Ze względu na wysoką temperaturę w pobliżu końcówki wtryskiwacza oraz świecy zapłonowej, przyszłościowym rozwiązaniem jest zapłon za pomocą promienia lasera. Daje to możliwość ustalania miejsca zapłonu przez odpowiednie ogniskowanie soczewek [19].

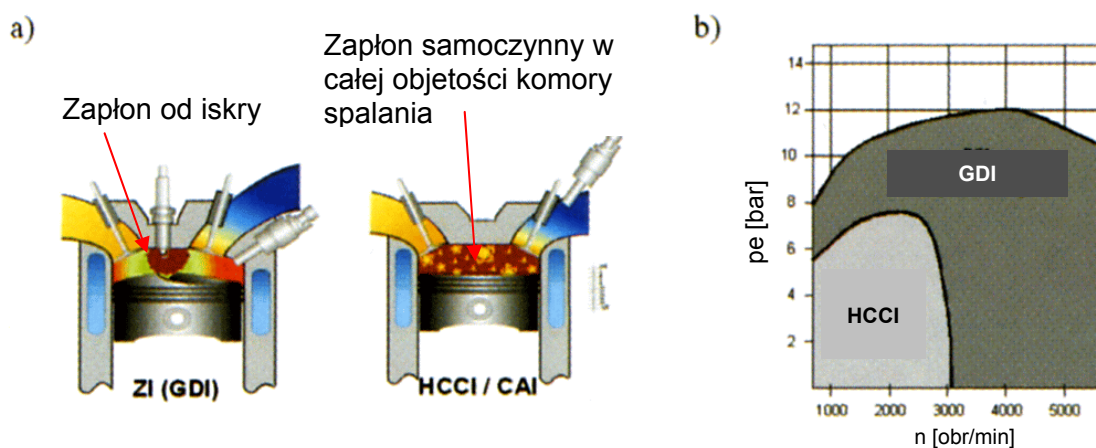
W praktyce stosuje się zasilanie mieszanką homogeniczną albo uwarstwową w różnych obszarach pracy silnika. Wykorzystuje się w ten sposób maksymalnie potencjał tych dwóch systemów, które przynoszą najlepsze rezultaty w innych obszarach prędkości obrotowej i obciążenia silnika (rys. 2.6.)



Rys.2.6. Przygotowanie mieszanki homogenicznej (a) albo uwarstwionej (b) [41].

2.2. Kontrolowany samozapłon - CAI (Controlled Auto Ignition)

Pewnym rozwinięciem homogenicznego GDI jest system CAI znany również jako HCCI – Homogenous Charge Compression Ignition, czyli samozapłon mieszanki homogenicznej z dużym stopniem recyrkulacji spalin (rys. 2.7).

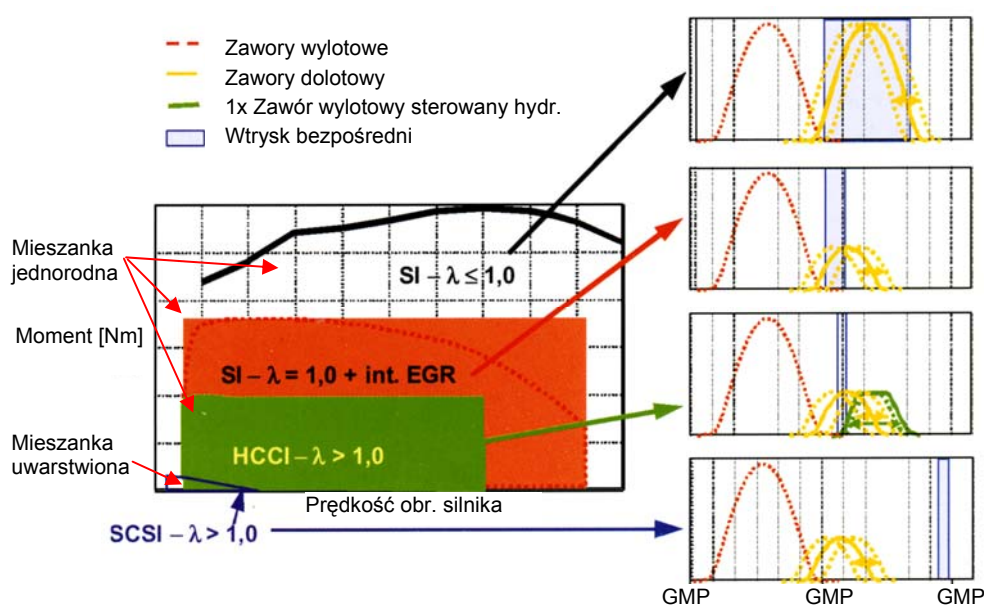


Rys 2.7. Hybryda zapłonu iskrowego i samoczynnego (a) oraz pole pracy silnika z systemem HCCI (CAI) - AVL CSI (b) [36].

System CAI zbliża do siebie procesy spalania charakterystyczne dla silników ZI oraz ZS. Spalanie mieszanki homogenicznej w znacznym stopniu zmniejsza emisję cząstek stałych

(ZS) i tlenków azotu (ZI, ZS), czyli najtrudniejszych do usunięcia składników spalin tworzących się w wyniku procesu spalania zachodzącego w środowisku bogatym w tlen.

W przypadku silników ZI, zapłon mieszanki powoduje iskra wywołana przez świecę, a w przypadku silników ZS jej zapłon następuje po wtrysnięciu paliwa do komory spalania. W silniku CAI sterowanie samozapłonem mieszanki odbywa się przez ciśnienie sprężania i temperaturę, skład mieszanki i właściwości paliwa. Warunki te są określone dla momentu zamknięcia zaworu dolotowego. Jednym z podstawowych parametrów regulacyjnych jest pozostałość reszty spalin w cylindrze. Ma ona wpływ na całkowitą temperaturę ładunku i stąd istotny wpływ na powstanie samozapłonu oraz na ilość gazu obojętnego określającego szybkość wywiązywania ciepła. W systemie CAI wymagane jest stosowanie układu zmiennych faz rozrządu, co umożliwia precyzyjną recyrkulację spalin i zmniejszenie strat wymiany ładunku, także podczas pracy z zapłonem iskrowym (rys. 2.8.) [41].

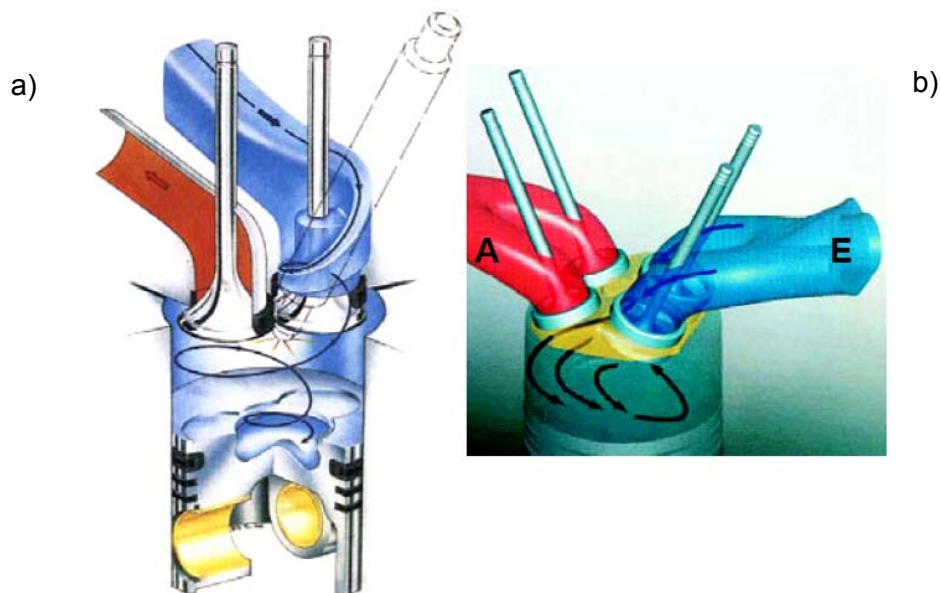


Rys 2.8. Strategia pracy silnika HCCI (CAI) - AVL CSI [17].

W silniku z systemem CAI można uzyskać nawet o 20 – 30 % mniejsze zużycie paliwa oraz zmniejszenie emisji NO_x o 90 - 99 %. Jednak ze względu na skomplikowany proces sterowania pracą silnika oraz możliwość stosowania samozapłonu w wąskim zakresie prędkości obrotowej i obciążenia (rys.2.9), bilans ekonomiczny oszczędności w zużyciu paliwa i nakładów kosztów produkcyjnych będzie mieć decydujące znaczenie we wprowadzeniu tego rozwiązania do masowej produkcji [44, 18, 24, 16].

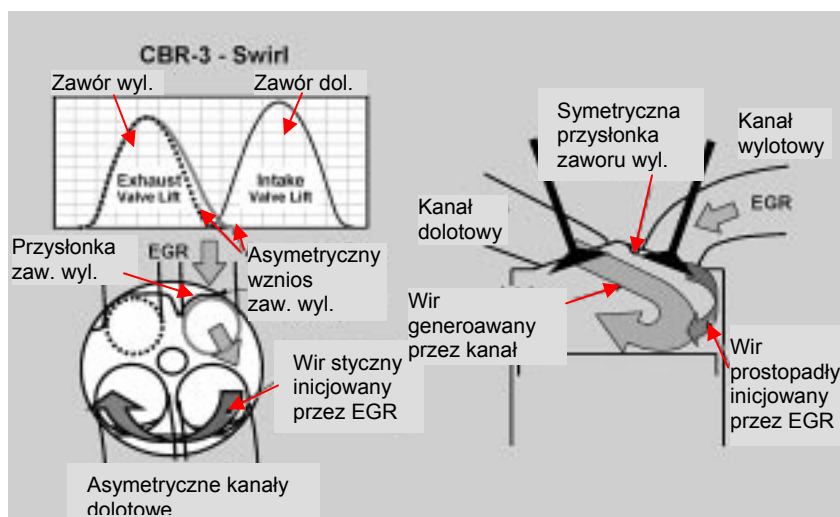
2.3. Zmienny przepływ ładunku - VCM (Variable Charge Motion).

Stosowanie ubogiej mieszanki czy recyrkulacji spalin (EGR) umożliwia zmniejszenie strat przepływu spowodowanych dławieniem wynikającym z działania przepustnicy. Zwiększanie zawiorowania ładunku przy częściowym obciążeniu zwiększa pewność spalania przy stosowaniu dużych stopni recyrkulacji spalin, co powoduje dalsze obniżenie zużycia paliwa. Przy dużym obciążeniu zbyt duże zawiorowania zwiększają opory przepływu ładunku lub powietrza zmniejszając wartość współczynnika napełniania. Intensywnością zawiorowania można sterować na różne sposoby. Prostą metodą jest stosowanie, w przypadku silników o 2 zaworach dolotowych na cylinder, kanałów pionowego i poziomego. Wtedy jeden kanał jest ułożony w ten sposób, że napływająca mieszanka porusza się prostopadle do ścianek cylindra, a drugi wprowadza mieszankę w ruch okrężny wokół osi cylindra. Ta asymetria oraz stosowanie regulowanej przesłony w kanale dolotowym powodują powstawanie dużej burzliwości przepływu w czasie gdy tłok znajduje się w pobliżu GMP, prowadząc do szybkiego i stabilnego spalania. Rozcieńczanie ładunku spalinami odbywa się przez dodatkowy, zewnętrzny zawór EGR. Na rys. 2.10. przedstawiono ruch mieszanki wywołany pionowym i poziomym ułożeniem kanału dolotowego.



Rys.2.10. Ruch ładunku przy zastosowaniu dolotowego kanału poziomego (a) i pionowego (b) [42].

Lepsze efekty w zawirowaniu ładunku przynosi zmienne sterowanie fazami rozrządu. Przez opóźnienie zamknięcia zaworu wylotowego można kierować spaliny bezpośrednio z kanału wylotowego do komory spalania wywołując przy tym zmianę prędkości ruchu ładunku (rys.2.11).



Rys. 2.11. Zmienny przepływ ładunku wywołany przez EGR oparty na regulacji otwarcia zaworów opracowany przez AVL [5].

W porównaniu z typowym rozwiązaniem ustalonego zawirowania, w przypadku zastosowania VCM można obniżyć zużycie paliwa o dodatkowe 5 – 8 % [43].

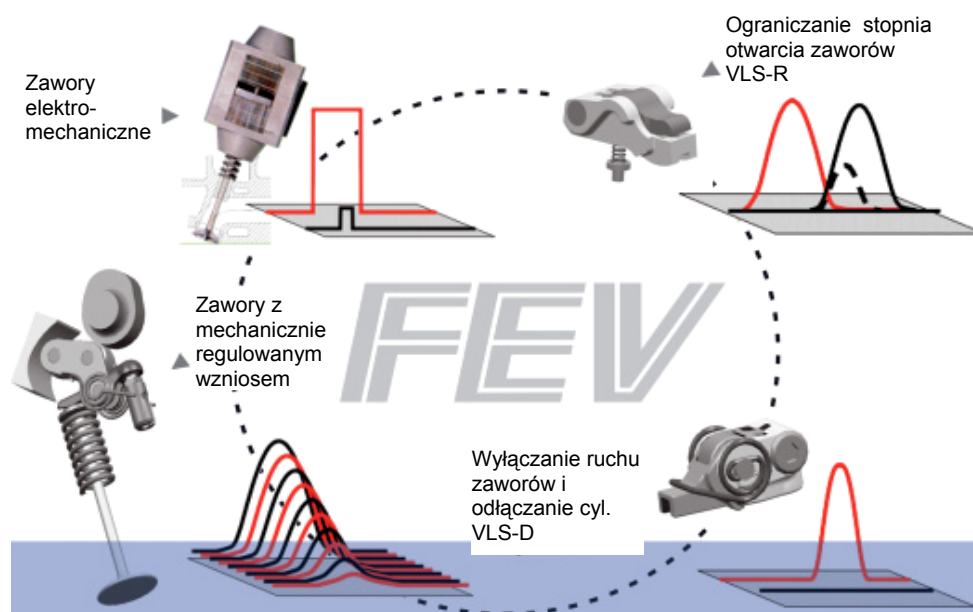
2.4. Zmienne sterowanie ruchem zaworów - VVA (Variable Valve Actuation).

Zmienne fazy rozrządu - VVT (Variable Valve Timing).

Częściowa lub całkowita regulacja ruchu zaworów może być realizowana w układach mechanicznych, hydraulicznych, elektromagnetycznych lub w ich kombinacji. Głównym celem stosowania tych systemów, w pierwszej kolejności, było zmniejszenie strat powodowanych dławieniem na przepustnicy, wyłączaniem z pracy poszczególnych cylindrów i poprawa pracy w dolnym zakresie momentu i prędkości obrotowej. W mniejszym stopniu dotyczyło to poprawy osiągnięć w górnym zakresie charakterystyki. Jak do tej pory prace rozwojowe trwają nad układami dającymi następujące możliwości:

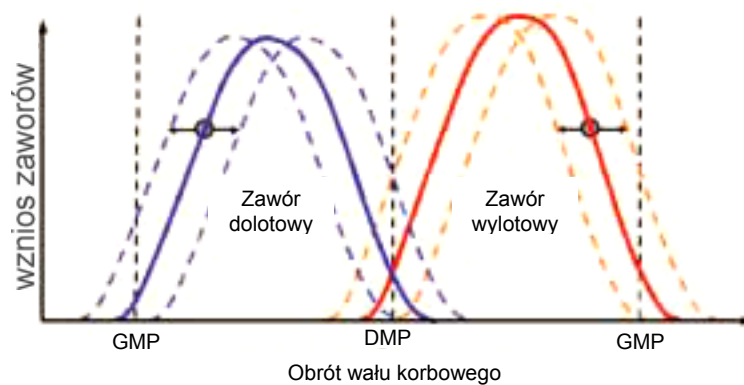
- zmianę faz rozrządu umożliwiającą przesuwanie początku otwarcia zaworów dolotowych i

- wylotowych, przy niezmiennym profilu krzywej zaworowej;
- wyłączanie ruchu zaworów przy wyłączaniu poszczególnych cylindrów z pracy silnika;
- zmianę skoku zaworów:
 - dwustopniową, przy zastosowaniu dwóch krzywek o różnym profilu;
 - płynną, umożliwiającą rezygnację z przepustnicy;
- pełną kontrolę nad ruchem zaworów, w przypadku układów elektromagnetycznych, niezależnie od kinetyki układu korbowego (rys. 2.12).

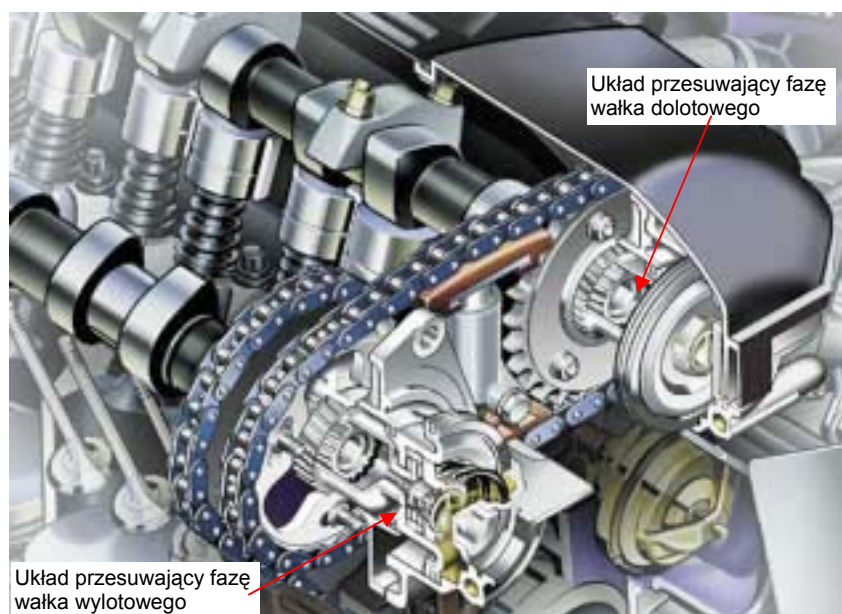


Rys. 2.12. Systemy regulowanego rozrządu opracowywane przez FEV [2].

Zmienne fazy rozrządu umożliwiają zmniejszenie zużycia paliwa, zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin oraz uzyskanie większej wartości momentu obrotowego i maksymalnej mocy. Podstawową funkcją zmiennych faz rozrządu jest zmiana kąta położenia wałka rozrządu względem wału korbowego (rys.2.13, rys.2.14). Daje to lepsze sterowanie napływem świeżej mieszanki, przepłukaniem cylindra lub możliwość wykorzystania zaworu wylotowego w funkcji wewnętrznego EGR i sterowania pozostałością reszty spalin. W przypadku starszych systemów regulacja była dwustopniowa w przeciwieństwie do obecnie stosowanej regulacji ciągłej. W prostszych rozwiązaniach stosuje się jedynie regulację rozrządu zaworów dolotowych.



Rys.2.13. Możliwości regulacji faz rozrządu [30].



Rys.2.14. System zmiennych faz rozrządu Double VANOS w BMW [30].

W porównaniu z silnikiem o dwóch zaworach, niewyposażonym w zmienne fazy rozrządu, silnik o czterech zaworach ze zmiennymi fazami rozrządu, umożliwia obniżenie zużycia paliwa nawet ponad 15 % podczas pracy na biegu jałowym i o 5 % przy częściowych obciążeniach.

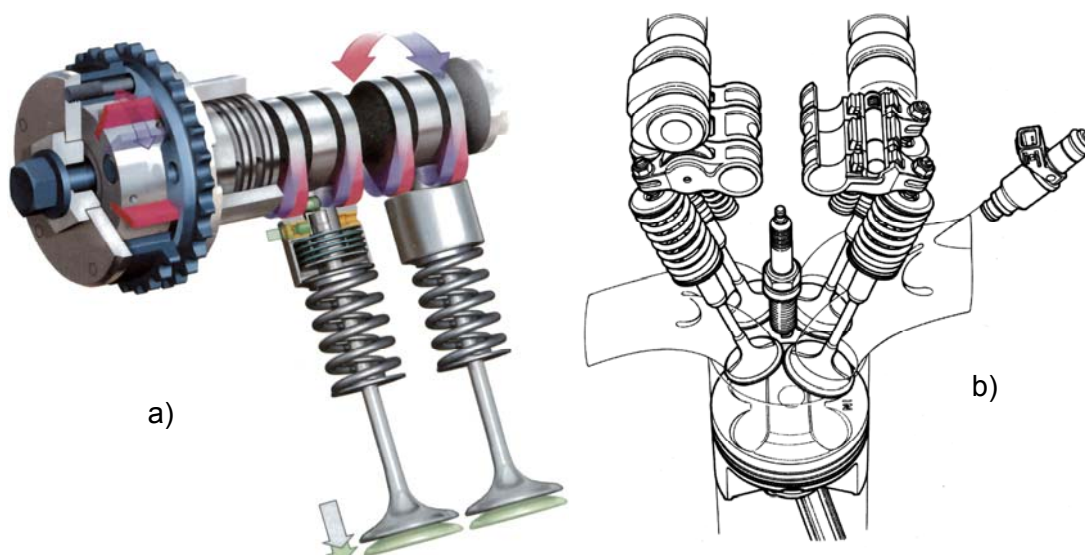
Wyłączanie cylindrów daje lepszy efekt przy większej liczbie cylindrów (6 lub 8) oraz niewielkich obciążeniach lub biegu jałowym, kiedy nie ma potrzeby wykorzystywania całej objętości skokowej silnika (rys.2.15). Technika ta według testu NEDC umożliwia przynajmniej 10 % zmniejszenie zużycia paliwa.



Rys. 2.15. System wyłączania poszczególnych cylindrów [2].

Układy z możliwością przełączania krzywek o różnym skoku zaworów służą do poprawnego sterowania przepływem mieszanki w szerszym zakresie prędkości i obciążenia silnika. Podczas pracy silnika przy częściowych obciążeniach skok zaworu dolotowego jest ograniczany, co powoduje znaczne skrócenie czasu jego otwarcia. W rezultacie regulacja obciążenia jest tylko częściowo sterowana otwarciem przepustnicy. Ponadto powoduje to zwiększenie prędkości przepływu mieszanki paliwowo-powietrznej i jej zawirowanie wpływające na poprawę procesu spalania. W celu dodatkowego zintensyfikowania tego efektu zawory mogą być otwierane niesymetrycznie. Najlepsze rezultaty uzyskuje się przy połączeniu przełączalnych krzywek zaworowych ze zmiennymi fazami rozrządu (rys.2.16).

Największe możliwości w zmniejszaniu zużycia paliwa przez wykorzystanie zmiennego skoku zaworów, tak jak i wyłączanie poszczególnych cylindrów, dają silniki o dużej objętości skokowej. Związane jest to m.in. z polem pracy silnika, ponieważ silniki o dużej objętości skokowej częściej pracują w zakresie niskiej i średniej mocy oraz prędkości obrotowej, w porównaniu z silnikami o małej objętości.



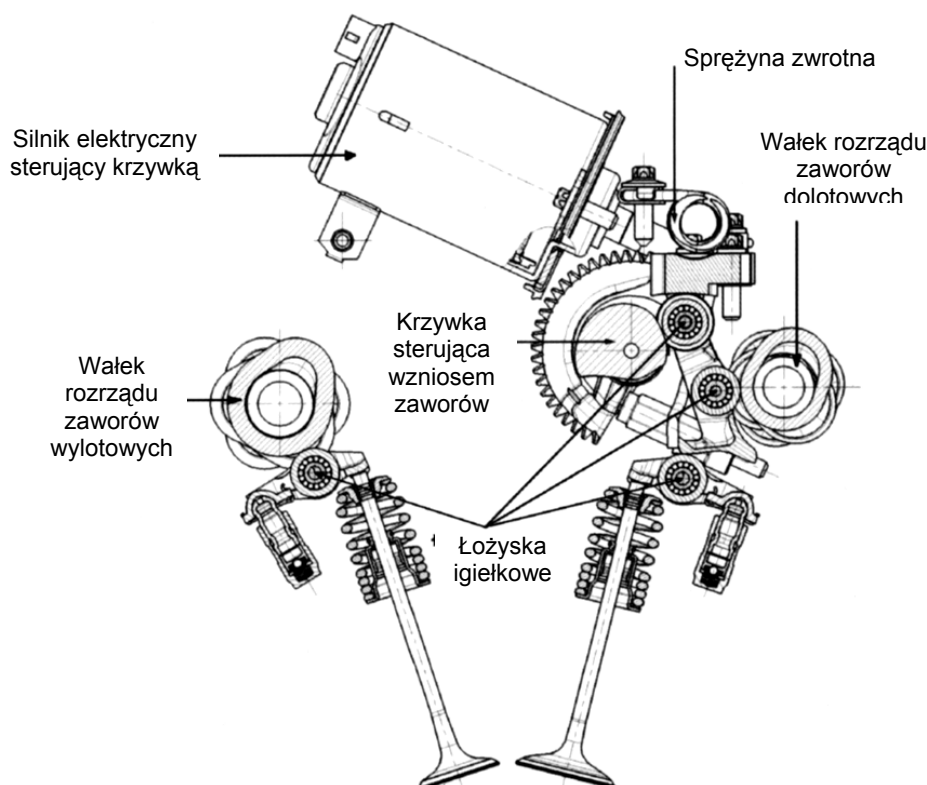
Rys. 2.16. Systemy o zmiennym skoku zaworów (przełączania krzywek)
Vario Cam Porsche (a) oraz i-VTEC Honda (b) [28].

Dodatkową korzyścią w przypadku stosowania zmniejszonego skoku zaworów czy odłączania cylindrów są mniejsze straty tarcia wynikające z redukcji sił w układzie rozrządu. Według testu NEDC w przypadku średniej wielkości, 4 cylindrowego silnika o objętości 2.0 l, obserwuje się zmniejszenie zużycia o ok. 8%, a w przypadku silnika o obj. 4.0 l i z 8 cylindrami o ponad 10 %.

Dalszym rozwinięciem rozrządu o zmiennych parametrach ruchu zaworów jest system o płynnej zmianie skoku zaworów. Jak do tej pory jedyny taki system stosowany seryjnie posiada BMW pod nazwą Valvetronic. Dzięki temu udaje się zrealizować:

- zwiększenie prędkości obrotowej silnika z 6500 do 7000 obr./min,
- zwiększenie przyspieszenia otwierania oraz maksymalnego wzniosu zaworu dolotowego w celu poprawy dynamiki napełniania,
- zmniejszenie strat wymiany ładunku (7%) dzięki bardziej stromej charakterystyce wzniosu zaworów przy częściowych otwarciach,
- zwiększenie współczynnika napełnienia i poprawy stabilności procesu spalania przez możliwość generowania zawirowania mieszanki,
- poprawę precyzji i dynamiki sterowania obciążeniem silnika,
- poprawienie równomierności rozprowadzenia ładunku do cylindrów, dzięki temu, że ciśnienie w układzie dolotowym jest bliższe ciśnieniu otoczenia, co wiąże się z brakiem przepustnicy,
- redukcję liczby urządzeń sterujących.

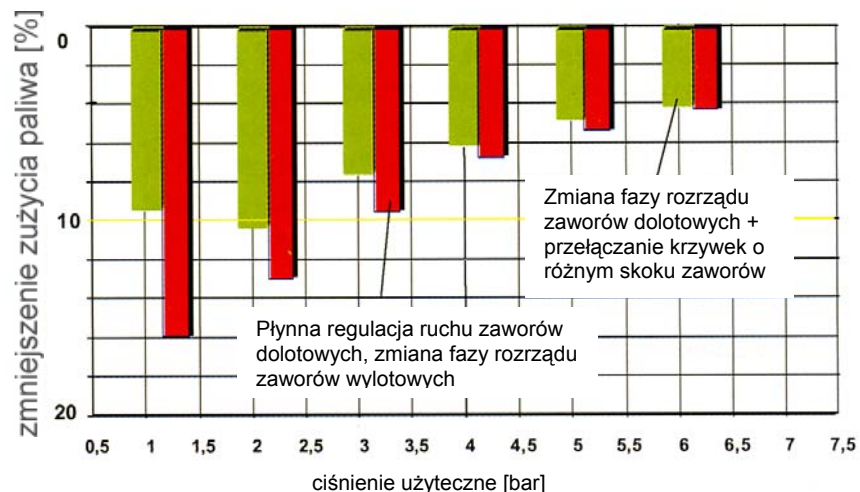
Za ruch zaworów dolotowych odpowiada układ dźwigni, krzywek oraz dodatkowy silnik odpowiedzialny za stopień wzniosu zaworów. Zawory napędzane są od wałka rozrządu (Rys.2.17).



Rys.2.17. System BMW Valvetronic, w którym regulowany skok zaworów dolotowych zastąpił przepustnicę [6].

Dzięki zastosowaniu układu Valvetronic osiągnięto w teście NEDC o 8,5 % mniejsze zużycie paliwa przez badany silnik. W stosunku do poprzedniej generacji silnika stosowanego w tym samym modelu uzyskano całkowite obniżenie zużycie paliwa wynoszące 12 %. Planuje się obniżenie o kolejne 3.5 % przez zmniejszenie całkowitych strat tarcia w czym Valvetronic również odgrywa znaczącą rolę, dzięki możliwości częściowego skoku zaworów oraz przez nową strategię nagrzewaniem silnika.

Na rysunku 2.18. porównano korzyści w zużyciu paliwa układu z ciągłą zmianą skoku zaworów względem systemu o przełączalnych krzywkach przy pracy silnika na częściowych obciążeniach.



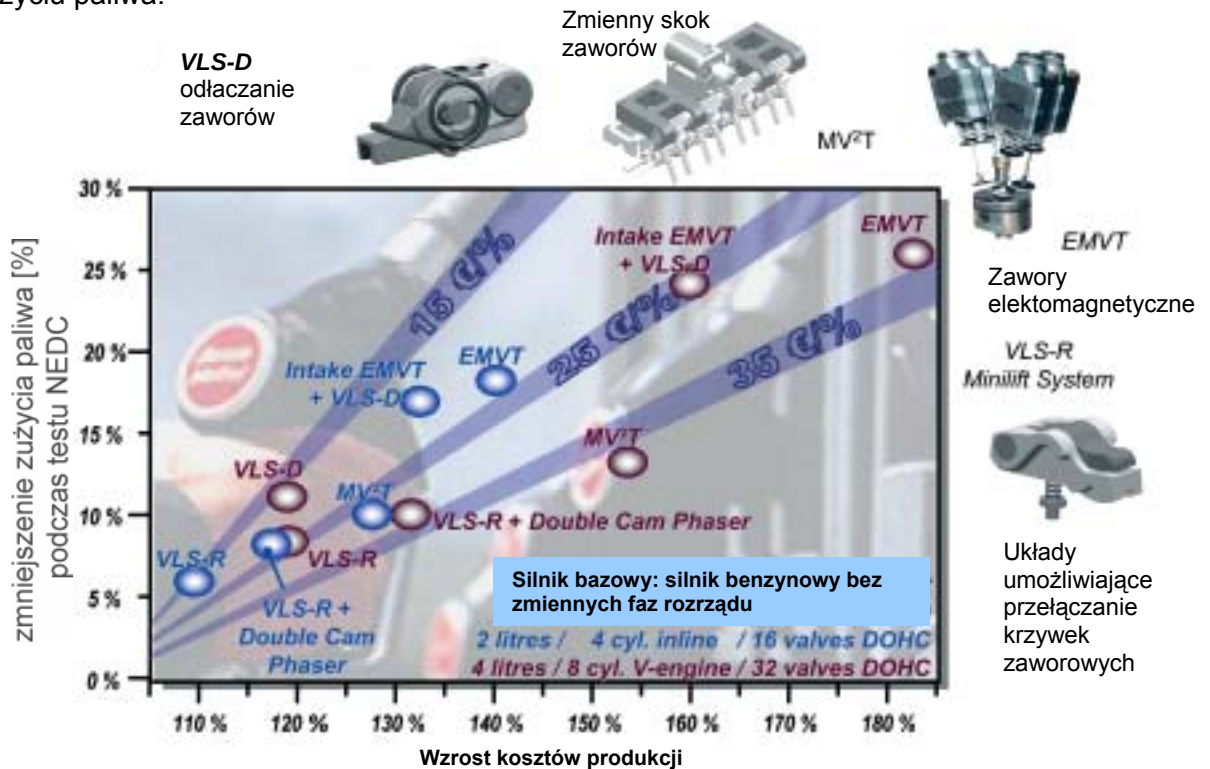
Rys.2.18. Porównanie systemów o przełączalnych krzywkach zaworowych oraz ciągłej zmianie skoku zaworów [17].

Spore możliwości odnośnie sterowania zaworami dają układy elektromagnetyczne. Ruch zaworu nie jest tutaj funkcją obrotu wału korbowego lecz czasu (skok i czas otwarcia zaworu jest w przybliżeniu stały), siły wymuszające są mniejsze przy wysokich obrotach niż w układach mechanicznych czy hydraulicznych. Istnieje pełna niezależność sterowania poszczególnymi cylindrami. Jednak ze względu na dużą moc potrzebną do ruchu zaworów przy wysokich prędkościach obrotowych, co pociąga konieczność użycia instalacji 42 V, nie przewiduje się wprowadzenia obecnie tego typu układów do seryjnej produkcji.

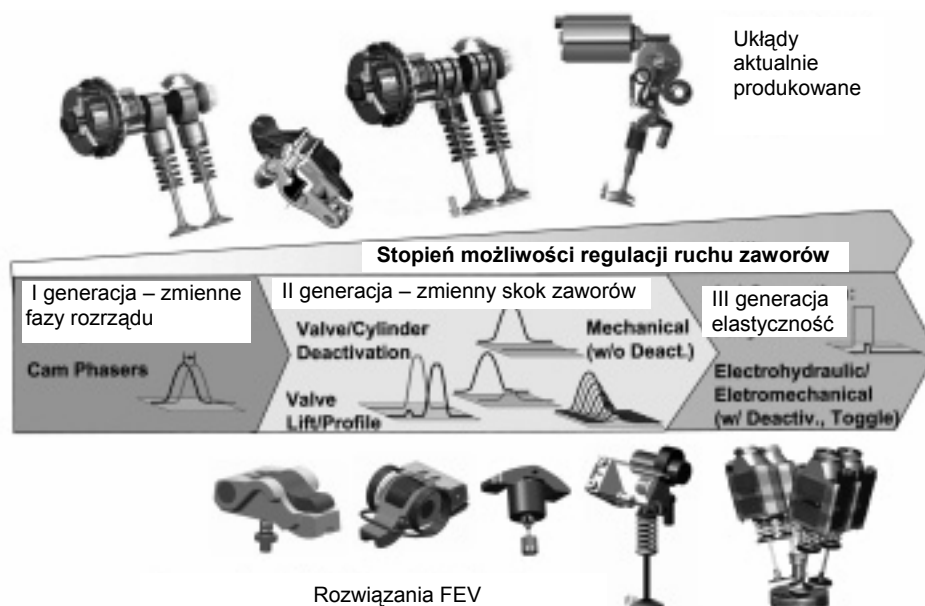
Elektrohydrauliczne układy bezkrzywkowe dają dodatkową możliwość zmiany wzniosu zaworów jak i szybkości otwierania i zamykania. System ten jest zdolny do pracy w szerokim zakresie prędkości obrotowej. Przy małych prędkościach i niewielkim wzniosie zaworów pobór mocy jest porównywalny lub nawet mniejszy niż w tradycyjnym układzie mechanicznym. Przewiduje się osiągnięcie dużych korzyści w obniżeniu zużycia paliwa, jak i poprawy przebiegu momentu obrotowego w dolnym zakresie prędkości obrotowej oraz zwiększenie maksymalnej mocy. Aktualnie trwają prace rozwojowe umożliwiające wprowadzenie w niedalekiej przyszłości tego typu układów do produkcji seryjnej [13].

Elektrohydrauliczne systemy z napędem krzywkowym nie podlegają takim ograniczeniom w zakresie wysokich prędkości obrotowych jak układy bezkrzywkowe. Do wad należy zaliczyć spore straty hydrauliczne, oraz ograniczone możliwości zmienności. Jednak stanowią one najtańszą bazę dla precyzyjnego sterowania samozapłonem przy obciążeniach częściowych.

Na rys.2.19. i rys.2.20. przedstawiono przewidywany rozwój poszczególnych rozwiązań oraz koszty ich wprowadzania do silników seryjnych, mając na uwadze oszczędności w zużyciu paliwa.



Rys.2.19. Stosunek kosztów produkcji do oszczędności zużycia paliwa dla różnych rozwiązań układów rozrządu [2].

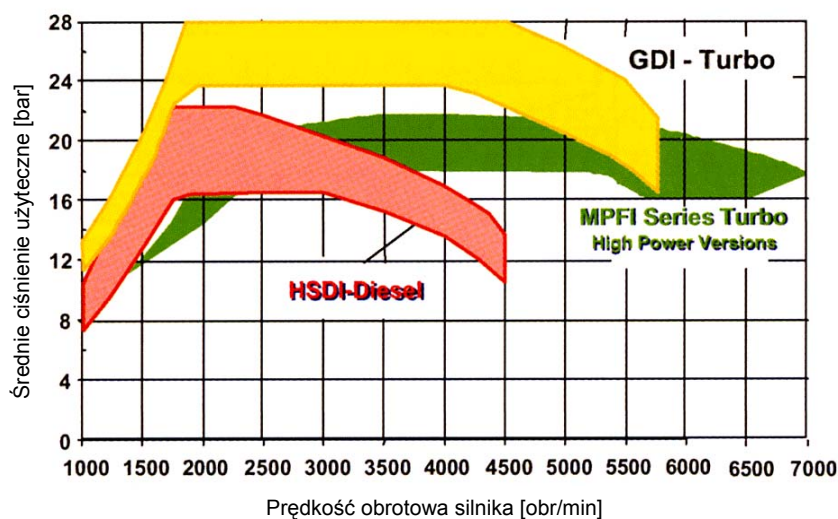


Rys.2.20. Kierunek rozwoju układów sterujących zaworami [2].

Według schematu przedstawionego na rys. 2.20 rozwój układów rozrządu można podzielić na trzy etapy. Układy pierwszej generacji wykorzystywały jedynie zmianę faz rozrządu. Układy drugiej generacji, coraz częściej stosowane, umożliwiają dodatkowo w stosunku do układów I-szej generacji regulację stopnia otwarcia zaworów. Regulacja może być skokowa, dwuzakresowa (przełączanie krzywek, odłączanie zaworów) lub płynna (Valvetronic). W układach trzeciej generacji, rozwój układów będzie dążył do uniezależnienia kinematycznego ruchu zaworów od obrotu wału korbowego.

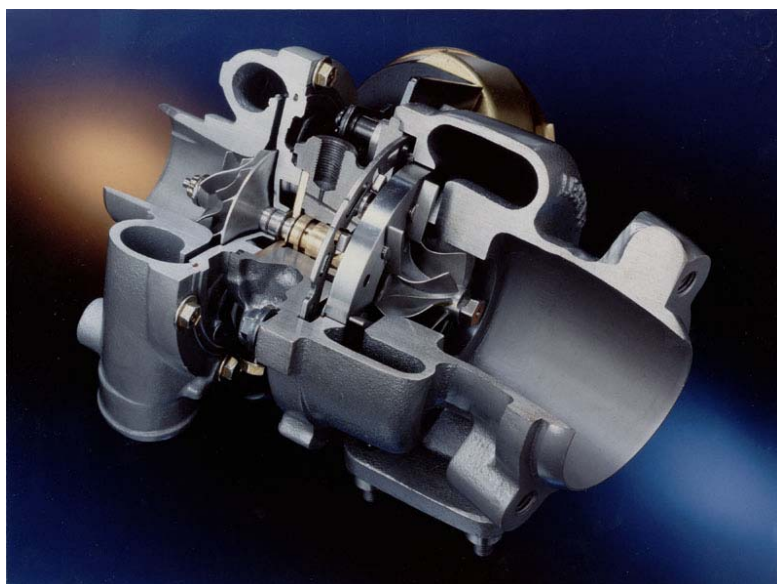
2.5. Turbodoładowanie

W przypadku silników z bezpośrednim wtryskiem paliwa znika większość podstawowych problemów związanych z turbodoładowaniem, występujących w silnikach MPI. Ze względu na wzmożone chłodzenie ładunku w silniku GDI spada skłonność do spalania stukowego. Umożliwia to zwiększenie stopnia sprężania, co w przypadku silników wolnossących nie poprawia w znaczący sposób sprawności ze względu na nieliniową zależność tych dwu parametrów. W przypadku silników doładowanych, pracujących zwykle z mniejszym stopniem sprężania niż silniki niedoładowane, zwiększenie wartości stopnia sprężania o 1 do 1,5 jednostek daje duże korzyści w obniżeniu zużycia paliwa przy dużych, jak i częściowych obciążeniach. Kolejną istotną cechą turbodoładowania przy zastosowaniu wtrysku bezpośredniego jest możliwość znacznego przepłukiwania cylindra (przy zastosowaniu zmiennych faz rozrządu). Umożliwia to osiągnięcie maksymalnego momentu obrotowego przy małych prędkościach obrotowych silnika. W przypadku silnika MPI oprócz świeżego powietrza do układu wylotowego dostaje się również niespalone paliwo, co powoduje jego stratę oraz wzrost ciepła wydzielanego skutkiem reakcji egzotermicznych w reaktorze katalitycznym mogących doprowadzić do uszkodzenia reaktora. Na rysunku 2.21 porównano charakterystyki silnika ZS oraz silnika ZI MPI na tle silnika GDI zwracając uwagę na niewielkie prędkości obrotowe.



Rys.2.21. Porównanie charakterystyk pełnej mocy turbodoładowanego silnika ZS z wtryskiem bezpośrednim oraz turbodoładowanych silników ZI; MPI i GDI [17].

Rozwinięciem systemu z pojedynczą turbosprężarką jest stosowanie układu z dwoma turbosprężarkami oraz układu turbosprężarki ze sprężarką mechaniczną lub turbosprężarki o zmiennej geometrii łopatek kierownicy turbiny VTG (rys.2.22). W przypadku turbosprężarki o stałej geometrii łopatek kierownicy zakres jej największej sprawności nie pokrywa się z całym zakresem pracy silnika.



Rys.2.22. Turbosprężarka o zmiennej geometrii łopatek kierownicy turbiny, VTG.

Stosowanie układu kaskadowego dwóch turbosprężarek lub turbosprężarki ze sprężarką mechaniczną o różnych charakterystykach przepływowych, oraz odpowiednie sterowanie nimi, pozwala na uzyskanie wysokiego ciśnienia doładowania w całym zakresie prędkości obrotowych silnika. Przyszłościowym rozwiązaniem jest również stosowanie turbosprężarki napędzanej dodatkowym silnikiem elektrycznym dającym możliwość regulacji ciśnienia doładowania przy niewielkich prędkościach obrotowych silnika spalinowego.

Oprócz poprawy sprawności ogólnej silnika, stosowanie turbodoładowania jest istotnym elementem umożliwiającym „downsizing” silników.



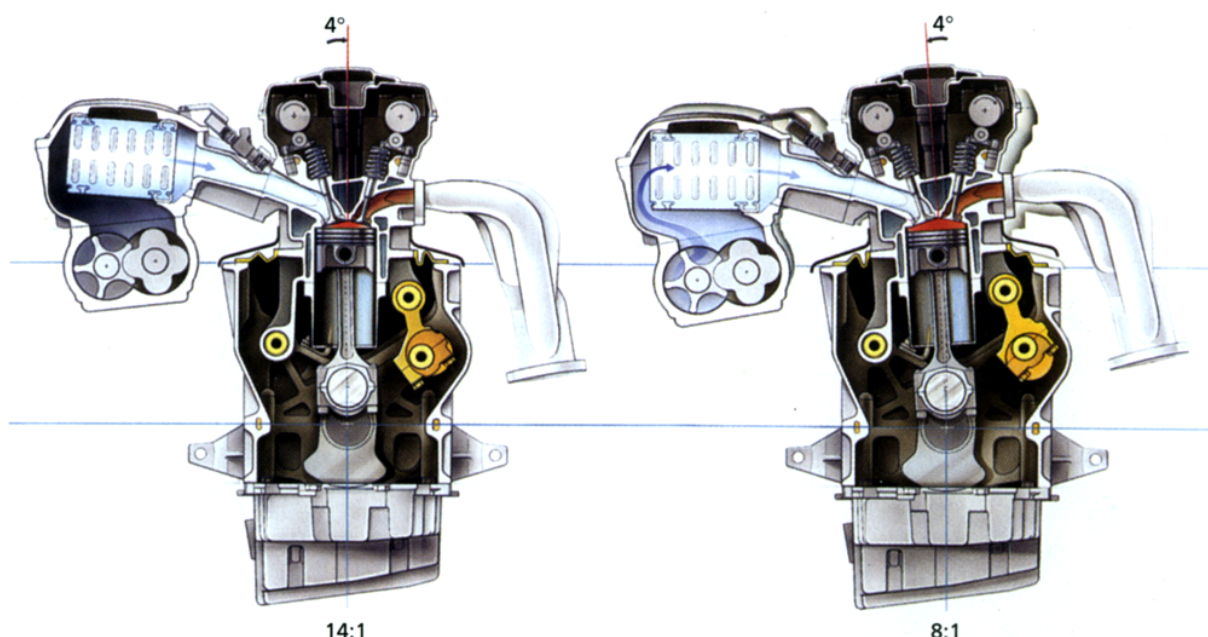
Rys.2.24. Zużycie paliwa turbodoładowanego silnika ZI ze zmiennym wzniosem zaworów dolotowych [2].

Na rys. 2.24 pokazano wpływ downsizingu na zmniejszenie zużycia paliwa. Zastowanie wtrysku bezpośredniego, turbodoładowania oraz systemu przełączania krzywek o różnym skoku zaworów umożliwia wg. testu NEDC, zmniejszenie zużycia paliwa o 25 %. [4, 27 ,31, 32].

2.6. Zmienny stopień sprężania - VCR (Variable Compression Ratio)

Zmienny stopień sprężania jest pomocnym sposobem w dążeniu do downsizingu silników ZI. Umożliwia on pracę z większym obciążeniem i w związku z tym większą sprawnością. Jednym z rozwiązań jest system zastosowany w silniku Saab 1.6 I VCS (rys.2.25). Zmianę stopnia sprężania uzyskuje się przez przemieszczanie głowicy wraz z

tulejami cylindrowymi względem osi wału korbowego. Dzięki temu otrzymano możliwość płynnej regulacji stopnia sprężania w zakresie od 8 do 14 jednostek.



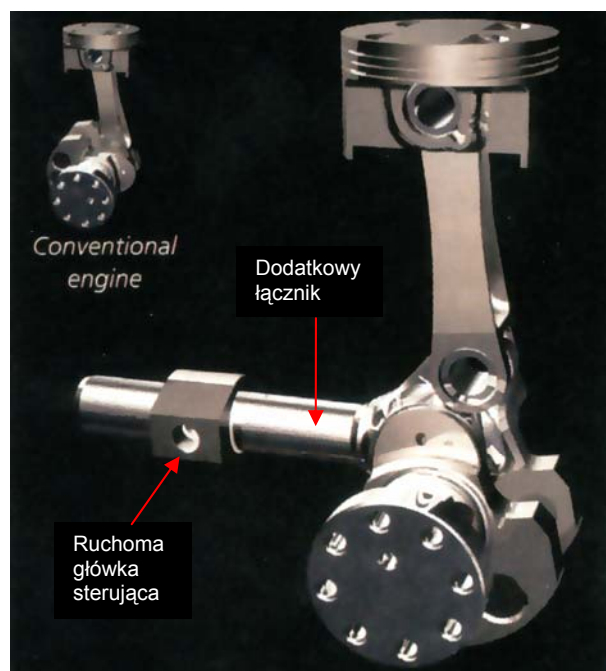
Rys.2.25. Silnik Saaba VCS o zmiennym stopniu sprężania [7]

Daje to doskonałą możliwość do doładowania silnika. W Saabie zamontowano mechanicznie napędzaną sprężarkę Rootsa. Silnik VCS może pracować przy małych obciążeniach z optymalnym, z punktu widzenia wykorzystania energii paliwa, stopniem sprężania 14:1. Przy dużych obciążeniach oraz doładowaniu stopień sprężania jest obniżany do 8:1, co zmniejsza skłonność powstawania spalania stukowego i umożliwia uzyskanie dużego momentu obrotowego oraz mocy. W przypadku silnika VCS wskaźniki te są na poziomie osiągniętych 3 litrowego silnika bez doładowania. Dodatkowo uzyskuje się, w przypadku standardowego cyklu jezdny, do 30 % niższe zużycie paliwa oraz zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin.

2.7. Zmienna objętość skokowa silnika - VD (Variable Displacement)

Zmiana objętości skokowej umożliwia utrzymanie silnika w zakresie obciążenia odpowiadającego jego wysokiej sprawności. Dodatkowo, przy bardziej rozbudowanych systemach, w istotny sposób obniżone są straty tarcia wynikające z ruchu pary tłok-cylinder. Najprostszą metodą, o której wspomniano w punkcie 2.4., jest odłączanie poszczególnych

cylindrów. W koncepcyjnych układach takich jak system Myflower e3 istnieje możliwość płynnej regulacji objętości skokowej oraz stopnia sprężania, aby dostosować jego wartość do aktualnego obciążenia silnika (rys.2.26). Układ korbowy wyposażony jest w dodatkowe ogniwo łączące panewkę wału korbowego i korbowód. Łącznik ten, z drugiej strony, osadzony jest suwliwie w ruchomej główce, której położenie zmienia kinematykę ruchu tłoka. Dodatkową cechą tego układu jest eliptyczny ruch dolnej główki korbowodu, co powoduje chwilowe zmniejszenie prędkości tłoka tuż po zapłonie, pozwalając na rozprzestrzenienie się płomienia w komorze spalania o małej objętości.



Rys.2.26. Układ korbowy systemu Myflower e3 z dodatkowym ramieniem regulacyjnym umożliwiającym płynną zmianę objętości skokowej oraz stopnia sprężania.

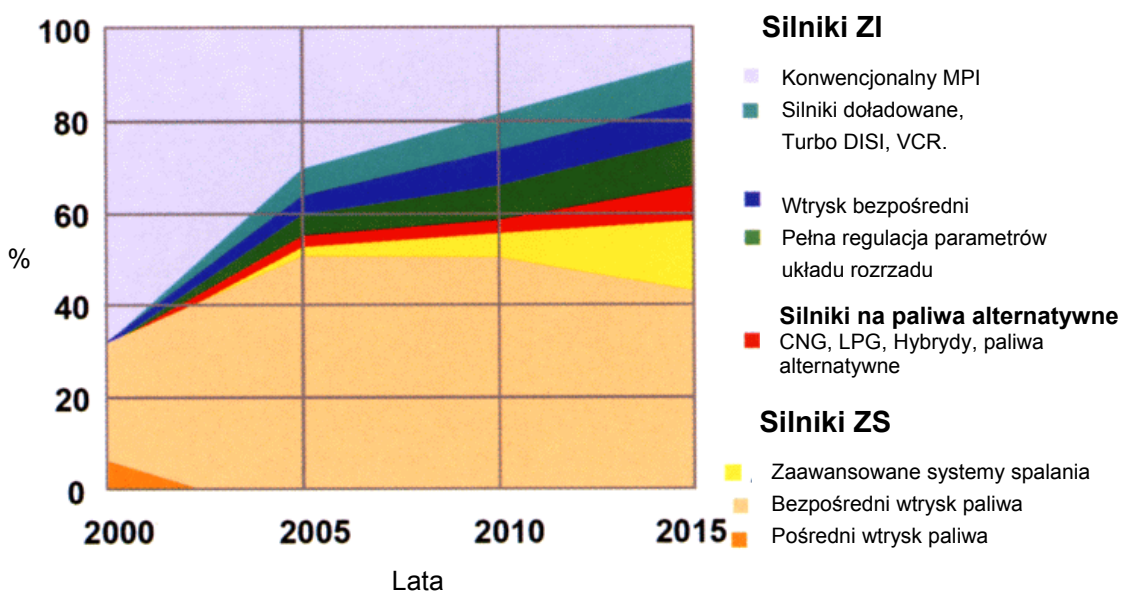
Według wstępnych prób w silniku z badanym systemem uzyskano zmniejszenie zużycia paliwa o 40 % oraz zmniejszenie emisji szkodliwych związków o 50 %. Rozwiązanie to nadaje się do stosowania w silnikach dwusuwowych, czterosuwowych, ZI, ZS, doładowanych mechanicznie, turbodoładowanych, ze zmiennymi fazami rozrządu oraz z wtryskiem bezpośrednim [29, 56].

W tab. 2.1. przedstawiono możliwości zmniejszenia zużycia paliwa przez silnik, wynikające ze stosowania różnych sposobów realizacji procesów roboczych.

Zawieranie ładunku w silnikach 4-zaworowych za pomocą wyłączania kanałów dolotowych	5 – 7 %
Zawieranie ładunku w silnikach 2-zaworowych za pomocą urządzeń zmieniających fazę rozrządu	4 – 5 %
Bezpośredni wtrysk benzyny (ścianki/wir)	8 – 12 %
Bezpośredni wtrysk benzyny (struga)	12 – 15 %
Downsizing silników turbodoładowanych	8 – 15 %
Mechaniczna zmiana faz rozrządu	5 – 10 %
Elektrohydrauliczna zmiana faz rozrządu	12 – 15 %
Spalanie ładunku jednorodnego HCCI	8 – 12 %

Tab.2.1. Potencjalne oszczędności paliwa w cyklu NEDC przy zastosowaniu różnych technik w silnikach benzynowych (silnik bazowy : 2.0l 4-cyl, MPI $\lambda = 1$)

Na rys. 2.27. przedstawiono udział liczby pojazdów wyposażonych w opisane w niniejszym rozdziale, rozwiązania stosowane seryjnie oraz trendy rozwoju silników spalinowych. Obecny poziom rozwoju silników spalinowych uprawnia do przekonania, że jeszcze długo będą one stanowić podstawowe źródło napędu pojazdów.



Rys.2.27. Prognozy rozwoju rodzajów silników i ich udziału na rynku motoryzacyjnym w Europie [14].

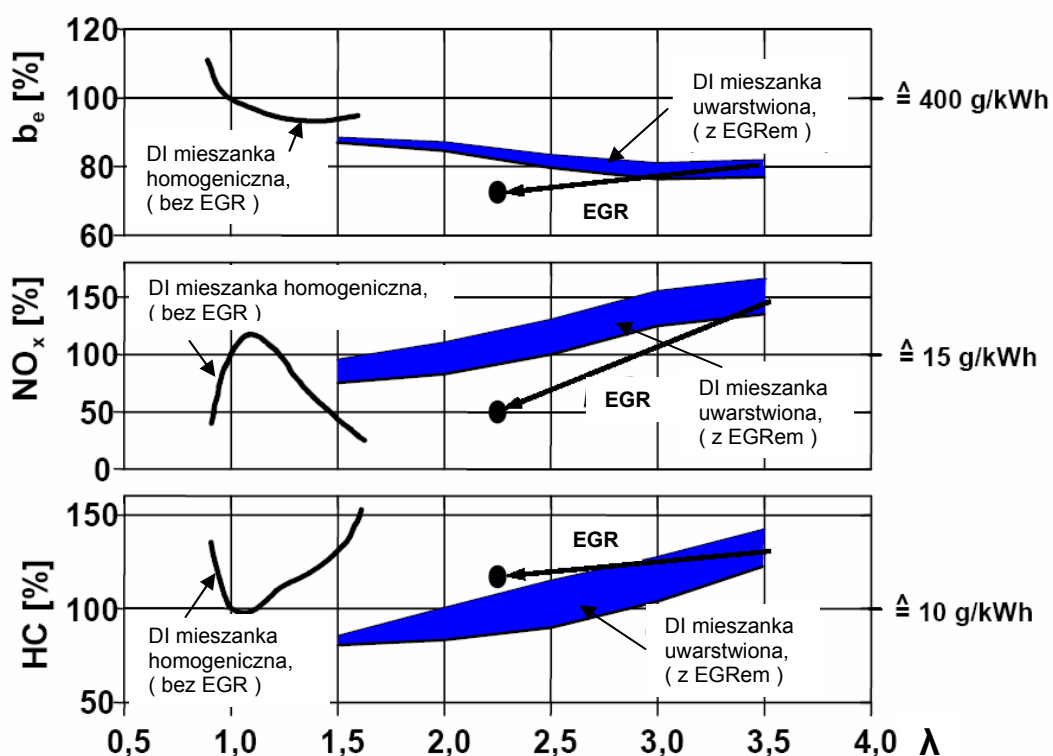
Mimo, że pojawiają się układy hybrydowe, nie przewiduje się w najbliższej przyszłości, że zdominują rynek. Na pewno jednak silnik będzie w coraz większym stopniu wspomagany urządzeniami elektrycznymi, jak choćby elektrycznie sterowane zawory, zintegrowany rozrusznik-generator, czy też elektryczne doładowanie.

Zauważa się również znaczący wzrost udziału silników wysokoprężnych do napędu pojazdów oraz silników zasilanych paliwami alternatywnymi. Są nimi głównie paliwa gazowe CNG, LNG, LPG, wodór oraz biopaliwa.

Spełnienie przyszłych wymagań dotyczących zmniejszenia emisji CO₂ oraz emisji toksycznych składników spalin będzie podstawowym kryterium wyznaczającym kierunek rozwoju silników spalinowych. Europejski Związek Ośrodków Badawczych Pojazdów EARPA (*European Automotive Research Partners Association*) przewiduje w swych prognozach, że po wprowadzeniu norm Euro V kolejnymi etapami będą już tylko wprowadzane limity zużycia paliwa.

3. Sposoby zmniejszania emisji tlenków azotu w silnikach spalinowych.

Zwiększanie sprawności cieplnej silnika wiąże się z lepszym wykorzystaniem energii zawartej w paliwie dostarczanym do cylindra. W związku z tym pojawiają się w komorze spalania, lokalnie lub globalnie obszary gdzie występuje wysoka temperatura spalania oraz często duże stężenie tlenu. Jest to podstawowy czynnik wpływający na wzrost emisji tlenków azotu przez silnik. Na rys. 3.1 przedstawiono emisję NO_x, HC oraz jednostkowe zużycie paliwa przy różnych technikach tworzenia mieszanki (homogenicznej i uwarstwionej).



Rys.3.1. Porównanie charakterystyk silnika z wtryskiem bezpośrednim (DI) przy pracy na mieszance homogenicznej i uwarstwionej [42]

W celu obniżenia ilości generowanych przez silnik tlenków azotu (NO_x) zwykle stosuje się:

- obniżenie maksymalnej temperatury spalania,
- układy recyrkulacji spalin (EGR – Exhaust Gas Recirculation).

Obniżenie maksymalnej temperatury spalania można uzyskać przez zabiegi regulacyjne silnika np. zmianę kąta wyprzedzenia zapłonu oraz wtrysku lub zmniejszenie napełnienia cylindra. Stosując układy recyrkulacji spalin (EGR), dzięki większej pojemności cieplnej

spalin oraz zmniejszeniu prędkości wydzielania ciepła, doprowadza się do obniżenia maksymalnej temperatury czynnika roboczego, a przez to do zmniejszenia emisji tlenków azotu. Wpływ recyrkulacji spalin na stężenie NO_x w spalinach jest zależny od składu mieszanki. Zwiększanie pozostałości spalin w cylindrze można również uzyskać na drodze zmian faz rozrzędu.

3.1. Metody obniżenia emisji tlenków azotu w procesie obróbki spalin za silnikiem

Podstawowym narzędziem do oczyszczania spalin w silniku ZI pracującym przy zasilaniu mieszanką stechiometryczną ($\lambda = 1$) jest katalityczny reaktor utleniająco-redukujący (TWC – Three Way Catalyser) umieszczony w układzie wylotowym silnika, w którym wykorzystano technikę nieselektywnej katalitycznej redukcji (NSCR – Non Selective Catalitic Reduction).

Podczas pracy silnika na ubogiej mieszance, obniżenie emisji tlenków azotu uzyskać można stosując specjalne techniki oczyszczania spalin. Są to:

- selektywna niekatalityczna redukcja (SNR – Selective Non Catalitic Reduction)
- selektywna katalityczna redukcja (SCR – Selective Catalitic Reduction).

Coraz powszechniej wprowadzaną metodą oczyszczania spalin z tlenków azotu jest stosowanie reaktora umożliwiającego magazynowanie tlenków azotu oraz późniejsze ich redukowanie. Jest nim magazynujący reaktor DeNO_x (Decomposition NO_x). Reaktor ten działa w oparciu o nieselektywną katalityczną redukcję (NSCR) tlenków azotu.

3.2. Nieselektywna katalityczna redukcja tlenków azotu (NSCR – Non Selective Catalytic Reduction)

W spalinach przepływających przez katalityczny reaktor utleniająco-redukujący TWC zachodzą jednoczesne reakcje utleniania niespalonych węglowodorów i tlenków węgla oraz redukcji tlenków azotu. Warunkiem skutecznego działania katalitycznego reaktora utleniająco-redukującego są odpowiednie proporcje reagentów w spalinach. Odpowiedni skład spalin występuje przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną. Wymaga to precyzyjnej regulacji składu mieszanki, najczęściej przy wykorzystaniu sprzężenia zwrotnego w układzie elektronicznego sterowania wtryskiem paliwa, wyposażonego w czujnik tlenu umieszczony w układzie wylotowym (sonda lambda) [3].

Ze względu na kinetykę reakcji zachodzących w reaktorze można wyróżnić dwa przypadki.

Pierwszy zachodzi wtedy, gdy ciągle występuje uboga mieszanka, tzn. z nadmiarem tlenu i następuje zmniejszenie ilości CO w spalinach, tym samym zaczyna brakować tego składnika do redukcji tlenku azotu (1).

Drugi, gdy w zakresie bogatej mieszanki stężenie tlenu jest niewystarczające do podtrzymania przemiany węglowodorów i tlenku węgla i przeważa reakcja redukcji NO, w wyniku czego tworzy się dwutlenek węgla i azot (2).

W celu obniżenia stężenia szkodliwych składników spalin w silniku benzynowym, współczynnik nadmiaru powietrza musi być utrzymywany w bardzo wąskich granicach, w praktyce zwykle $\lambda = 0,99-1,01$. Przekroczenie granicy w kierunku bogatej mieszanki prowadzi do wzrostu stężenia HC i CO, natomiast zubożenie mieszanki (poza granicę $\lambda > 1$), powoduje zmniejszenie stopnia konwersji tlenków azotu (rys.1.5).

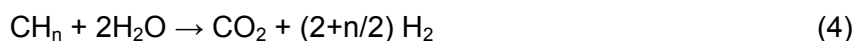
Podstawowe reakcje chemiczne, które powinny zachodzić jednocześnie w katalitycznym reaktorze TWC przedstawić można następująco:



Ciągle prowadzone są jednak rozmaite prace rozwojowe zmierzające w kierunku poszerzenia zakresu pracy katalizatora.

Pierwszym sposobem było wprowadzenie na zewnętrzną powierzchnię materiału nośnika wykonanego z Al_2O_3 , tlenków rodu, stanowiących swego rodzaju zapas tlenu. W zakresie ubogiej mieszanki tlen jest bezpośrednio wiązany z powierzchnią nośnika, co w przypadku chwilowego niedoboru tlenu w spalinach w zakresie bogatej mieszanki, pozwala utleniać węglowodory i tlenek węgla.

Drugim sposobem przemiany węglowodorów i tlenku węgla, także w zakresie bogatej mieszanki, jest zastosowanie takiego katalizatora, który pobudzałby lub przyspieszał reakcje rozkładu węglowodorów. Dzięki temu część palnych składników toksycznych w spalinach może zostać utleniona, także w warunkach niedoboru tlenu. W tym celu wykorzystana bywa para wodna, która znajduje się w spalinach w dostatecznej ilości:



Jednak procesy zachodzące w katalizatorze są bardzo złożone i obok reakcji, w których następuje usunięcie głównych składników toksycznych, zachodzą również pewne reakcje uboczne.

Ważnym czynnikiem wpływającym na sprawność konwersji reaktora jest temperatura spalin. Temperatura reaktora nie powinna przekroczyć granicy około 1150 [°K], a równocześnie po uruchomieniu zimnego silnika możliwie szybko powinien być nagrzany, aby rozpocząć normalną pracę. Moment poprawnego działania reaktora jest określony stopniem nagrzania monolitu i znajdującej się na nim warstwy katalitycznej, niezależnie od temperatury otoczenia. Za temperaturę początku działania reaktora przyjęto temperaturę, przy której następuje przemiana około 50 % zawartości szkodliwych składników, i wynosi ona około 550 [°K].

Zastosowanie katalitycznego reaktora utleniająco-redukującego ograniczone jest do silników ZI pracujących na mieszance o składzie zbliżonym do stechiometrycznego. Dla silników, które zasilane są głównie mieszkankami ubogimi reaktor tego typu pełni tylko funkcje utleniające, natomiast nie rozwiązuje problemu emisji tlenków azotu. Dotyczy to głównie silników o zapłonie samoczynnym, a także nowoczesnych silników o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem paliwa, które w pewnych stanach pracy zasilane są mieszkanką ubogą.

Rodzaj reaktora	Reaktory utleniająco-redukujące TWC (Three Way Catalyser)
Monolity	Ceramiczne, metalowe
Nośnik	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{ZrO}_2$ oraz dodatki stabilizujące termicznie
Zasadniczy katalizator	Pd/Rh, Pt/Rh, Pd/Pt/Rh,
Ważniejsze cechy użytkowe	wysoka konwersja CO, HC i NO _x przy składzie mieszanki bliskim wartości stechiometrycznej, podnosi zużycie paliwa, produkcja N ₂ O, H ₂ S

Tab. 3.1. Ważniejsze cechy katalitycznych reaktorów utleniająco-redukujących (TWC) [33].

3.3. Selektywna niekatalityczna redukcja tlenków azotu

(SNR – Selective NonCatalytic Reduction)

Selektywna niekatalityczna redukcja (SNR), polega na wykorzystaniu redukujących właściwości mocznika lub amoniaku, która zachodzi w temperaturze 1100 – 1400 [°K]. Procesy redukcyjne zachodzą bez użycia katalizatora.

Reakcje zachodzące podczas redukcji przebiegają następująco wg schematu:



lub



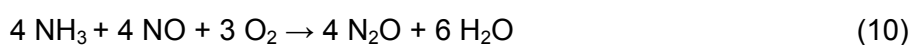
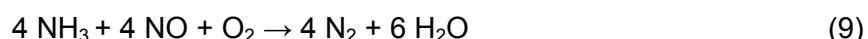
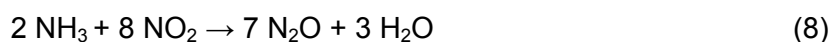
Oprócz niedogodności wynikającej z konieczności dawkowania mocznika lub amoniaku, inną wadą tej metody jest utrzymanie reagentów w wysokiej temperaturze. Z tych względów stosowanie tej metody w silnikach spalinowych ograniczone jest głównie do silników stacjonarnych, natomiast z powodzeniem stosowana jest ona w niektórych procesach technologicznych lub w urządzeniach energetycznych.

3.4. Selektywna katalityczna redukcja tlenków azotu

(SCR – Selective Catalytic Reduction)

Metoda ta wymaga również stosowania doprowadzonego z zewnątrz czynnika redukującego, lecz sama reakcja zachodzi w reaktorze katalitycznym, przy znacznie niższej temperaturze niż w przypadku selektywnej, niekatalitycznej redukcji. Jako czynniki redukujące wykorzystuje się tu zwykle związki zawierające azot (mocznik, amoniak) lub węglowodory.

Przy użyciu amoniaku NH_3 w reaktorze zachodzą następujące reakcje;

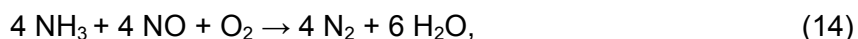


W wyniku powyższych reakcji chemicznych, powstaje woda i azot, a także niepożądany podtlenek azotu N_2O , który jest bardzo trwały i ma wpływ na zwiększenie intensywności efektu cieplarnianego [25].

W silnikach spalinowych pracujących na mieszance o znacznym nadmiarze powietrza mogą ponadto zachodzić reakcje nieprzyczyniające się do rozkładu tlenków azotu, a powodujące straty czynnika redukującego:



Najbardziej korzystna jest reakcja [25]:



która jednak zachodzi tylko w dość wąskim zakresie temperatury, pomiędzy 570-650 [°K].

Przy wyższej temperaturze dominować mogą jednak pozostałe reakcje.

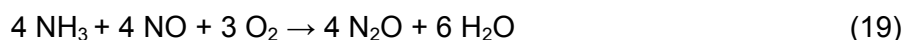
Stosując jako czynnik redukujący mocznik ($H_2N-CO-NH_2$), należy podawać go do gorących spalin o temperaturze nie niższej niż 430 [°K], dzięki czemu zachodzi jego hydroliza, w wyniku której otrzymujemy amoniak (NH_3) [25]:



gdzie $\cdot NH_2$ jest aktywnym rodnikiem, który reagując z NO powoduje jego rozkład:



Natomiast wydzielony z mocznika amoniak wchodzi w reakcje z tlenkami azotu zgodnie z reakcjami:



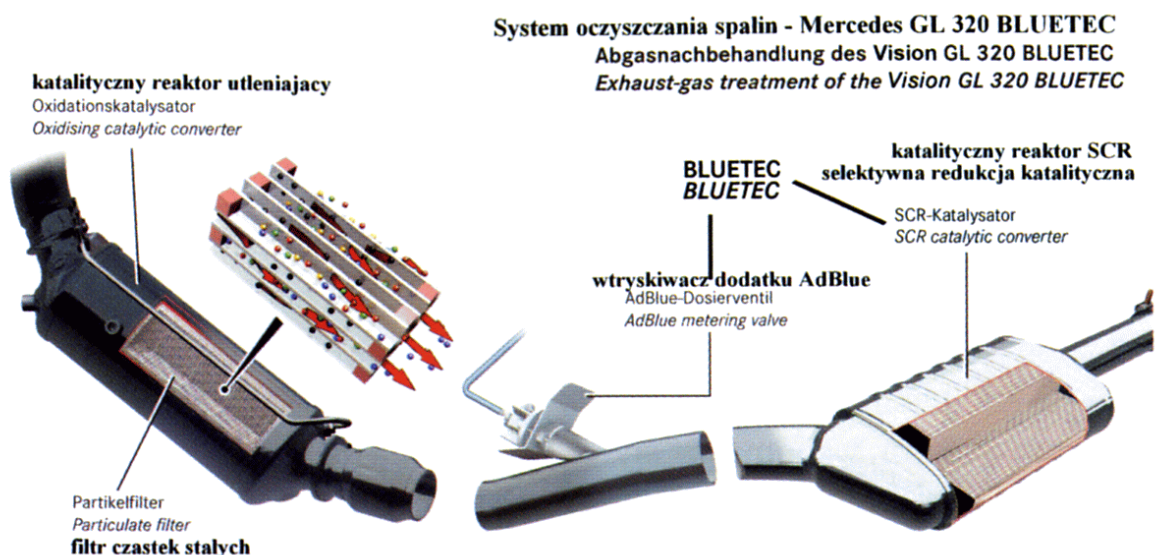
Rys.3.3. Selektywna katalityczna redukcja z użyciem amoniaku [42].

Użycie amoniaku lub mocznika do redukcji tlenków azotu w spalinach silnikowych jest jednak bardzo utrudnione nie tylko ze względu na konieczność stosowania dodatkowego

zbiornika na czynnik redukujący, lecz również ze względu na trujące właściwości i nieprzyjemny zapach amoniaku.

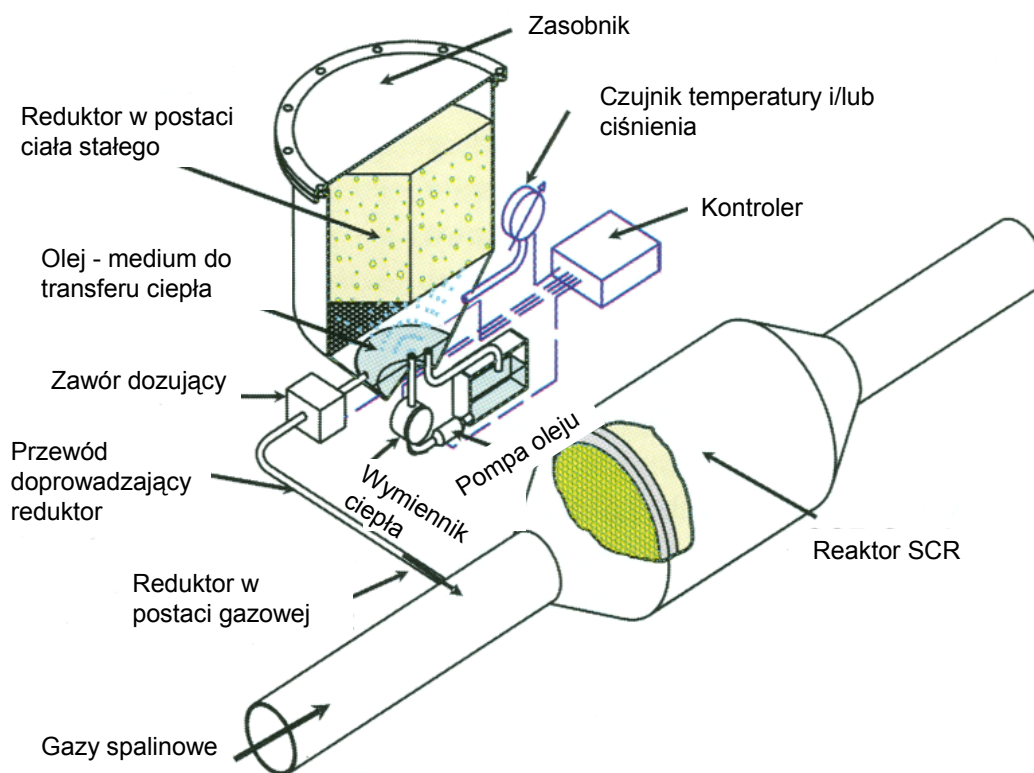
Jednak mimo ograniczeń, jest to technologia, nad którą prowadzone są badania rozwojowe umożliwiające wprowadzenie jej do produkcji seryjnej. Trwają prace nad udoskonalaniem czujników NO_x , NH_3 oraz mocznika, które stanowią istotny element systemu SCR. Dzięki temu, system SCR pozwoli na spełnienie przyszłych norm emisji stężenia NO_x , zwłaszcza normy EURO V. W dążeniu do tych zamierzeń tworzony jest standard czynnika redukującego mogącego być wykorzystanym w przyszłych pojazdach. Jest nim np. wodny roztwór mocznika pod handlową nazwą Adblue, a jego specyfikacja jest określona w normie DIN70070. Zbiornik z Adblue musi być zainstalowany w pojeździe. W Europie rozpoczęto już przygotowywanie instalacji przemysłowych umożliwiających produkcję Adblue na masową skalę.

Mercedes stosuje tą technologię w niektórych swoich modelach. W samochodach ciężarowych modele Actros BlueTec już teraz są w stanie spełnić normy Euro V. Wyposażone w 145-litrowy zbiornik AdBlue pojazdy BlueTec mają zasięg ponad 10 000 kilometrów. Dzięki temu, nie ma konieczności częstego uzupełniania czynnika redukującego. Ponadto, nie są one uzależnione od dostępności paliwa o niskiej zawartości siarki tak jak to ma miejsce w przypadku reaktorów DeNO_x . System ten wprowadzono także w osobowych modelach Mercedesa GL 320CDI Bluetec (rys.3.4).



Rys. 3.4. System BlueTec dozujący wodny roztwór mocznika AdBlue przed reaktor katalityczny (SCR).

Trwają też prace nad systemami, w których czynnik redukujący jest magazynowany w postaci ciała stałego. Pozwala to m.in. zmniejszyć objętość stałego czynnika do 28 % w stosunku do wodnego roztworu mocznika. Na rys.3.5. przedstawiono system dawkujący wykorzystujący karbamanian amoniaku. Przechowywany w zasobniku, karbamanian amoniaku po podgrzaniu do odpowiedniej temperatury przechodzi w stan gazowy. Układ kontrolera steruje układem podgrzewającym i dawkującym roztwór amoniaku w postaci gazowej do układu wylotowego silnika.



Rys.3.5. Układ dozowania środka redukującego w postaci ciała stałego (SCR) [47, 34].

Rodzaj reaktora	Reaktory NH ₃ -SCR
Monolity	ceramiczne
Nośnik	γ -Al ₂ O ₃
Zasadniczy katalizator	Tlenki metali, zeolity
Ważniejsze cechy użytkowe	wysoka konwersja i selektywność redukcji NO _x emisja amoniaku (NH ₃) problemy z transportem, przechowywaniem i dawkowaniem reduktora

Tab. 3.2. Ważniejsze cechy reaktorów do selektywnej katalitycznej redukcji tlenków azotu, SCR [33].

3.5. Selektywna katalityczna redukcja tlenków azotu (SCR) z wykorzystaniem związków węglowodorowych.

Znacznie bardziej praktyczną metodą redukcji tlenków azotu jest wykorzystanie związków węglowodorowych. Najczęściej redukcja z ich udziałem odbywa się w zeolitowych lub tlenkowych reaktorach katalitycznych [11, 15, 23, 38, 40, 46, 48, 59]

Zeolity są to glinokrzemiany charakteryzujące się dużą porowatością o strukturze zawierającej sieć kationów ziem alkalicznych. Stosowane obecnie w układach wylotowych silników reaktory zeolitowe używane w praktyce zbudowane są wyłącznie z materiałów syntetycznych. Najczęściej używanymi zeolitami, z których wykonana jest warstwa nośnika reaktora katalitycznego są: zeolit ZSM-5, mordenit lub ferieryt. Aktywnymi pierwiastkami, które znalazły zastosowanie w reaktorach zeolitowych są natomiast najczęściej: miedź, żelazo, mangan, platyna, rod lub nikiel.

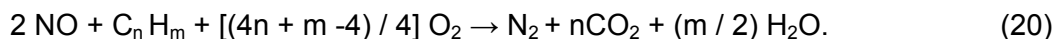
Reaktory tlenkowe mają nośnik zbudowany zwykle z tlenków metali takich jak np.: trójtlenek glinu. Warstwa aktywna pokryta jest zwykle takimi metalami szlachetnymi jak: srebro, pallad lub rod.

Sprawność konwersji reaktora zależna jest od wielu czynników, wśród których najważniejszymi są: rodzaj zeolitu, rodzaj materiału aktywnego, rodzaj i ilość zastosowanych węglowodorów, temperatura spalin, ilość tlenu i pary wodnej w spalinach oraz prędkość przepływu spalin. Sprawność konwersji tlenków azotu silnie uzależniona jest od rodzaju i

ilości węglowodorów występujących w reakcjach. W badaniach laboratoryjnych wykorzystywano jako środek redukujący C_2H_4 , C_3H_6 , C_3H_8 lub czysty wodór H_2 oraz alkohole. Bardzo skuteczne mogą być także węglowodory aromatyczne, parafinowe oraz olefinowe, czyli składniki zawarte zwykle w paliwie silnikowym. Rodzaj zastosowanego węglowodoru nie ma natomiast zbyt dużego wpływu na temperaturę największej sprawności katalizatora, która wynosi zwykle ok. 670 °K.

W omawianej metodzie redukcji NO_x w reaktorze katalitycznym wykorzystuje się węglowodory lub produkty ich utleniania. Mogą to być zarówno związki węglowodorowe znajdujące się w spalinach (np. produkty wstępnego utleniania) [26], jak i węglowodory celowo dozowane do reaktora. Sama koncepcja wykorzystania związków węglowodorowych wynika z analizy mechanizmu redukcji tlenków azotu w obecności tlenu, za pomocą związków azotu. Metoda ta polega na wykorzystaniu atomów wodoru, które bardzo łatwo łączą się z tlenem, wchodzącym w skład cząsteczki NO_x . Potrzebny do tego celu wodór może pochodzić właśnie z dodawanych związków węglowodorowych.

Reakcje redukcji tlenków azotu zachodzące w reaktorze katalitycznym (zeolitowym lub tlenkowym) przy wykorzystaniu związków węglowodorowych zachodzą według schematu [12]:



gdzie: m i n – liczby naturalne.

W praktycznych zastosowaniach, w silnikach o zapłonie samoczynnym, węglowodory doprowadzane są do cylindra w dodatkowej dawce paliwa, wtryskiwanej podczas procesu rozprężania. Ten sposób dawkowania określany jest jako powtrysk paliwa. Podobny sposób doprowadzenia związków węglowodorowych może mieć miejsce również w nowoczesnych silnikach o zapłonie iskrowym, wyposażonych w bezpośredni wtrysk paliwa do cylindra i pracujących na ubogich ładunkach. W tym przypadku możliwe jest też doprowadzenie związków węglowodorowych do spalin, bezpośrednio przed reaktorem katalitycznym. Jednak ze względu na wartość temperatury, miejsce dodawania węglowodorów do spalin ma duże znaczenie na przebieg procesów redukcji NO_x , ponieważ jest to związane z liczbą i aktywnością chemiczną rodników, uzyskanych podczas wstępnego rozpadu cząsteczek węglowodorowych. Z tego powodu znacznie korzystniejsze jest dostarczanie dodatkowych węglowodorów bezpośrednio do cylindra, gdzie ulegają one rozpadowi, a ponadto metoda ta nie wymaga dodatkowych systemów dawkowania i umożliwia wykorzystanie do tego celu głównego wtryskiwacza paliwa i jego systemu sterującego. Dodatkowa dawka paliwa

wtryśnięta w czasie procesu rozprężania ulega znacznym przemianom fizyko-chemicznym. W wyniku oddziaływania gorących spalin następuje termiczny rozpad cząstek węglowodorów oraz zachodzą wstępne reakcje utleniania wykorzystujące tlen zawarty w spalinach. Wynikiem tych reakcji jest powstanie bardzo aktywnych związków takich jak: wodór atomowy H, wodór cząsteczkowy H₂ oraz różnego rodzaju rodniki jak np.: tlen $\cdot\text{O}$, $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{CH}_3$, $\cdot\text{CH}_3\text{O}$, $\cdot\text{CH}_2$, $\cdot\text{HO}_2$, które wykazują silne własności redukujące NO_x. Związki te wchodzi w reakcje z tlenkami azotu już w cylindrze silnika, dzięki czemu znaczna część tlenków azotu ulega redukcji termicznej w cylindrze i kolektorze wydechowym, jeszcze przed dojściem do reaktora katalitycznego. W reaktorze redukcja NO_x przebiega w obecności katalizatora, a jej mechanizm zależy zarówno od czynnika redukującego, jak i rodzaju katalizatora. W konsekwencji tego typu metoda obniżania emisji NO_x wykorzystuje oba rodzaje redukcji, tj. termiczną, niekatalityczną redukcję (SNR) [22, 45, 48], zachodzącą w cylindrze i kolektorze wylotowym, oraz selektywną, katalityczną redukcję (SCR) [11, 15, 23, 38, 40, 46, 55, 58].

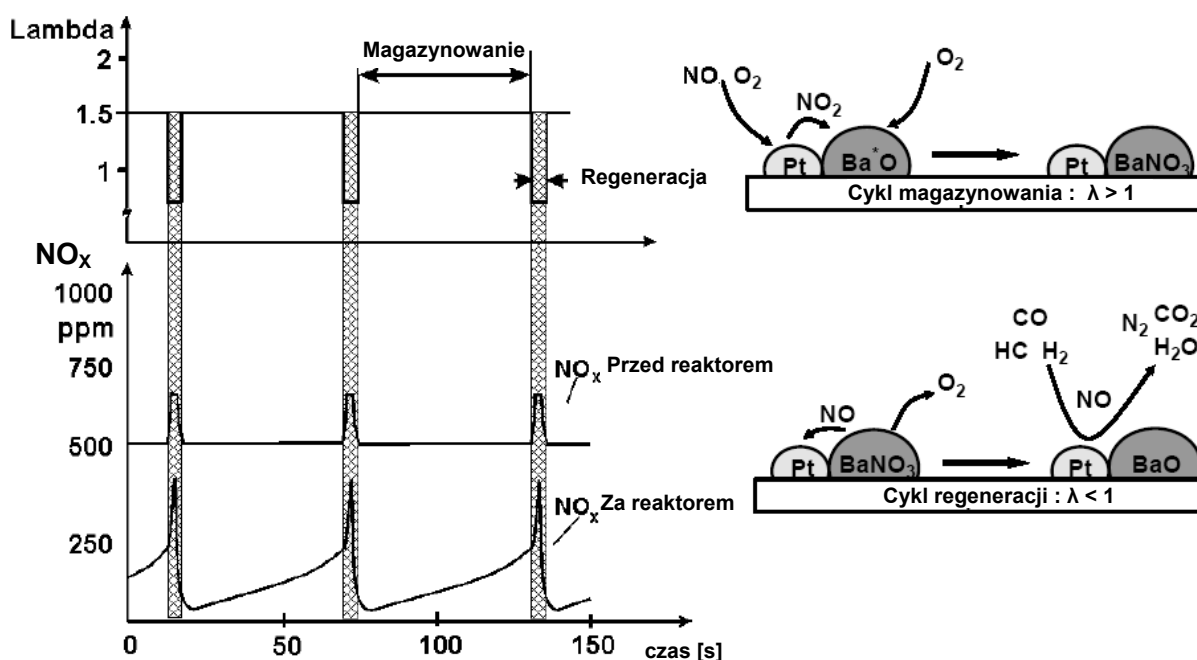
Rodzaj reaktora	Reaktory HC-SCR
Monolity	ceramiczne metalowe
Nośnik	zeolity, tlenki metali i ich układy
Zasadniczy katalizator	zeolity, tlenki, metale na zeolitach i tlenkach
Ważniejsze cechy użytkowe	niższa konwersja i selektywność NO _x niż w NH ₃ -SCR mała aktywność w niskiej temperaturze, wtórna emisja HC

Tab.3.3. Ważniejsze cechy reaktorów do selektywnej katalitycznej redukcji z udziałem węglowodorów SCR [33]

3.6. Katalityczny reaktor magazynujący tlenki azotu

Pojawienie się katalitycznych reaktorów magazynujących tlenki azotu umożliwiło rozwój systemów zwiększających sprawność silnika przez stosowanie ubogich mieszanek. Aby reaktor magazynujący mógł spełniać wymogi normy EURO IV, sprawność konwersji NO_x musi wynosić między 85 a 95 %. Uwzględniając cykle pracy z okresowym

oczyszczaniem podczas, którego następuje spadek sprawności konwersji NO_x do ok. 80 – 85 %, w zależności od krzywej magazynowania, możliwe jest osiągnięcie wypadkowej sprawności powyżej 90 %. W reaktorze magazynującym jednocześnie musi zajść konwersja tlenku węgla i węglowodorów. Konwersja CO w przypadku spalania mieszanki ubogiej nie jest dużym problemem, ponieważ w tych warunkach w spalinach występuje niewielkie stężenie CO i przepływa przez reaktor utleniający. Niespalone węglowodory nie ulegają łatwo konwersji w przypadku ubogich mieszanek. Większość z nich jak np. metan są trudne do utleniania i powstaje ich więcej w silnikach z wtryskiem bezpośrednim niż w przypadku silników MPI. Efekt ten jest szczególnie widoczny w czasie pracy przy częściowych obciążeniach silnika kiedy to spaliny mają zbyt niską temperaturę aby reaktor mógł pracować poprawnie [8].

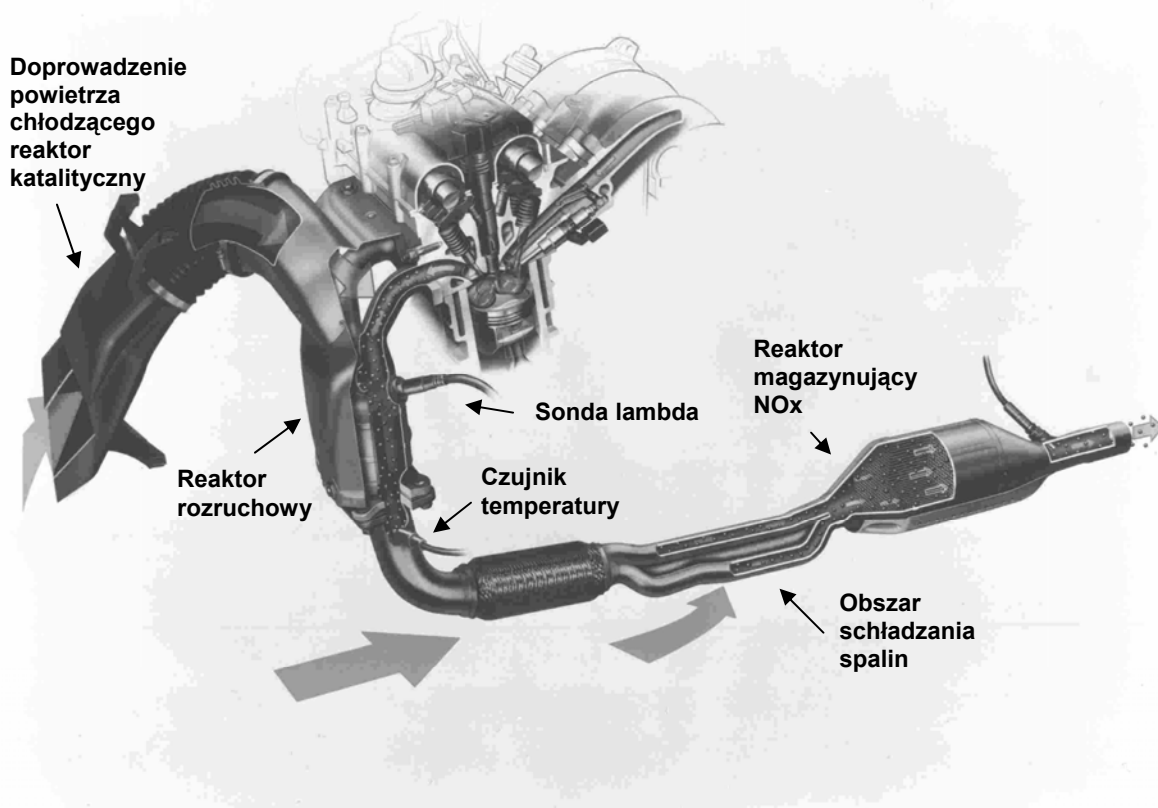


Rys. 3.6. Cykle pracy reaktora magazynującego DeNOx [5]

Na rys. 3.6. przedstawiono cykle pracy reaktora magazynującego oraz proces magazynowania tlenków azotu i regeneracji katalizatora. W czasie pracy silnika na ubogiej mieszance, tlenki azotu ze spalin są wychwytywane i magazynowane przez alkaliczne tlenki metali, np. tlenek baru (cykl magazynowania). Katalizator magazynuje tlenki azotu, gdy temperatura spalin zawiera się pomiędzy 470 – 770 [°K] oraz współczynnik $\lambda > 1$. Co pewien czas, w momencie, w którym stężenie NO_x za reaktorem przekroczy poziom sygnalizujący

przepełnienie reaktora, następuje krótkotrwałe wzbogacenie mieszanki do $\lambda < 1$ (cykl regeneracji). W tych warunkach zmagazynowany w katalizatorze w postaci BaNO_3 tlenek azotu, ulega redukcji do N_2 . Problemem reaktora magazynującego jest „zatrucie” katalizatora siarką i podatność na dezaktywację termiczną. Kwaśne tlenki siarki osiadając na powierzchni katalizatora ograniczają zdolność przechwytywania NO [22]. Podczas spalania bogatej mieszanki część tlenków siarki jest uwalniana, ale w mniejszym stopniu niż NO, powoduje to szybką utratę możliwości magazynowania NO_x w reaktorze [33].

System sterowania silnika posiada specjalny tryb pracy odpowiedzialny za odsiarczanie reaktora. Proces odbywa się okresowo, średnio po przejechaniu przez samochód ok. 500 km. Odsiarczanie polega na zasilaniu silnika wzbogaconą mieszkanką jednorodną, co wywołuje przez kilka minut wymagany, okresowy wzrost temperatury spalin do wartości około 870 – 970 °K, co uzyskiwane jest poprzez stosowanie odpowiedniej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Na rys. 3.7. przedstawiono układ oczyszczania spalin w silniku z bezpośrednim wtryskiem paliwa i pracującym na ubogiej, uwarstwionej mieszance paliwowo-powietrznej, Volkswagen FSI.



Rys. 3.7. Schemat układu oczyszczania spalin silnika FSI wyposażonego w reaktor magazynujący [52, 54].

Rodzaj reaktora	Reaktory NSR, magazynujące
Monolity	Ceramiczne, metalowe
Nośnik	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{ZrO}_2$ oraz dodatki stabilizujące termicznie
Zasadniczy katalizator	Pd/Rh/BaO, Pd/Pt/Rh/BaO,
Ważniejsze cechy użytkowe	Niższa sprawność konwersji CO, HC i NO_x niż w TWC wymaga okresowej zmiany składu mieszanki (uboga - bogata), wymaga paliwa niskosiarkowego, nieodporny na spiekanie, generuje N_2O

Tab.3.4. Ważniejsze cechy katalitycznych reaktorów NSR magazynujących [33]

4. Emisja toksycznych składników spalin silnika pracującego na ubogiej mieszance paliwowo-powietrznej propanu-butanu

Problem emisji toksycznych składników spalin istnieje również w silnikach o zapłonie iskrowym, które zasilane są paliwami gazowymi. Wprawdzie w tym przypadku stężenie toksycznych związków spalin można łatwo zmniejszyć wyposażając silnik w klasyczny, katalityczny reaktor utleniająco-redukujący, lecz pod warunkiem, że silnik zasilany jest mieszkanką stechiometryczną.

Ubogie mieszanki paliw gazowych z powietrzem mają większy zakres zdolności zapłonu niż w przypadku benzyny w tych samych warunkach. Spalanie ubogiej mieszanki gazowo-powietrznej daje możliwość zwiększenia sprawności silnika. W tych warunkach uzyskuje się niewielkie stężenia produktów niezupełnego i niecałkowitego spalania (CO, HC), jednak nadmiar tlenu oraz wystarczająco wysoka temperatura spalania sprzyjają łączeniu azotu z tlenem co powoduje powstawanie toksycznych tlenków azotu. Tlenek węgla oraz niespalone węglowodory spalane są w reaktorze utleniającym. Tlenki azotu wymagają stosowania metod umożliwiających ich redukcję w środowisku bogatym w tlen. W tym celu, w przypadku zastosowań motoryzacyjnych możliwe jest wykorzystanie selektywnej katalitycznej redukcji z udziałem reduktora w postaci mocznika lub wykorzystanie katalitycznego reaktora magazynującego tlenki azotu, aby osiągnąć określone przez normy limity emisji NO_x.

4.1. Porównanie charakterystyk silnika oraz układu oczyszczania spalin przy zasilaniu benzyną oraz propanem-butanem

W projekcie badawczym [20] pod kierownictwem K. Golca przeprowadzono z udziałem autora badania na podstawie, których można porównać charakterystyki regulacyjne silnika zasilanego mieszkanką paliwowo-powietrzną benzyny oraz propanu-butanu. Charakterystyki stężenia toksycznych składników spalin, w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza pozwoliły również określić zakres stosowalności trójdrożnego katalitycznego reaktora TWC.

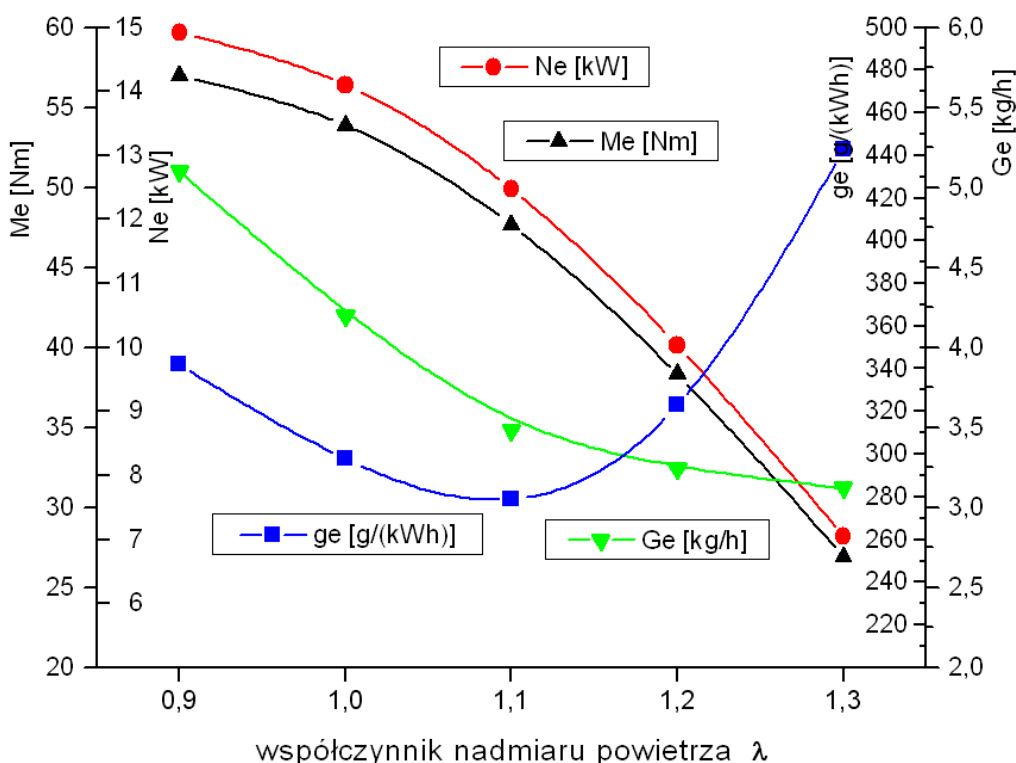
Na rys.4.1. przedstawiono charakterystykę silnika pracującego na benzynie w zakresie współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 0.9 - 1.3$. Na rys 4.2. przedstawiono charakterystyki dla silnika pracującego przy wtrysku propanu-butanu dla współczynnika nadmiaru powietrza w tych samych granicach. Na rysunku 4.1. oraz 4.2. widać, że minimalne jednostkowe

zużycie paliwa występuje przy wartościach składu mieszanki z benzyną zbliżonych do $\lambda = 1.1$ oraz z propanem-butanem w zakresie $\lambda = 1.1 - 1.2$. Odpowiada to maksymalnej sprawności ogólnej silnika.

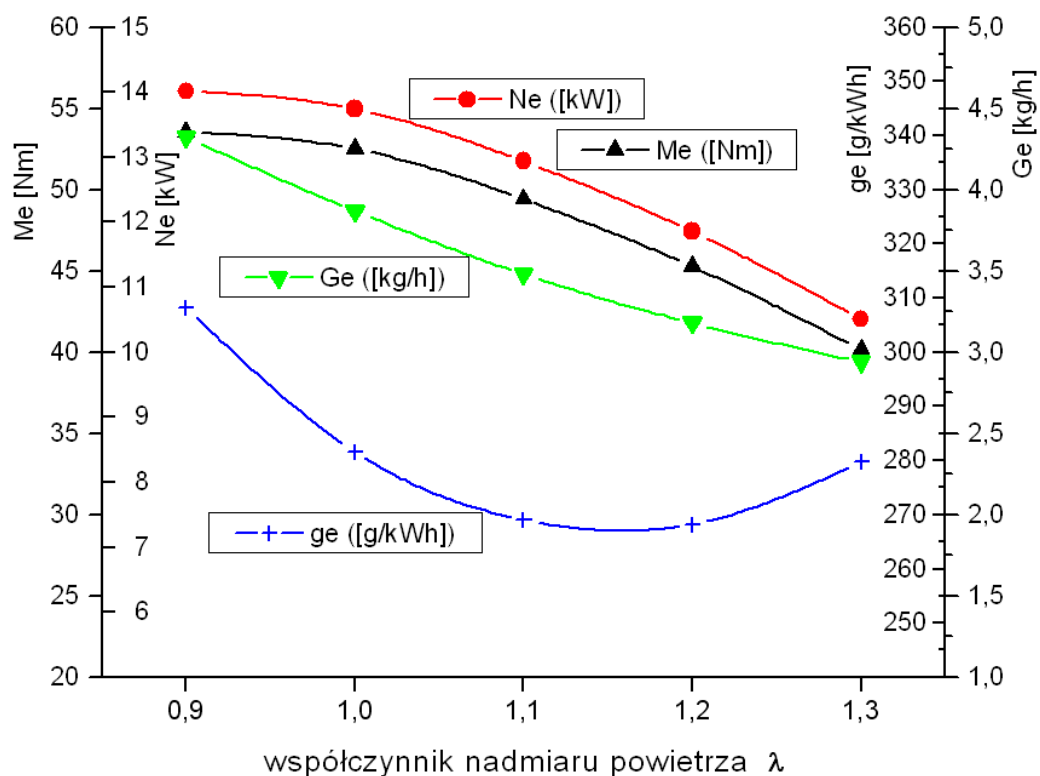
Na wykresach widać również, że dzięki szerokiej zapalności paliwa gazowego silnik jest mniej wrażliwy na zubażanie mieszanki i względna zmiana mocy jest mniejsza niż dla benzyny. Z tym samym wiąże się mniejsza zależność jednostkowego zużycia paliwa od składu mieszanki przy zasilaniu propanem-butanem.

Na rys. 4.3. i 4.4. przedstawiono przebiegi procentowego udziału składników spalin przed reaktorem, odpowiednio dla benzyny i propanu-butanu w funkcji λ . Sprawność konwersji toksycznych składników spalin przez reaktor trójfunkcyjny w zależności od składu mieszanki, przy zasilaniu benzyną, przedstawiono na rys. 4.5. oraz przy zasilaniu propanem-butanem na rys.4.6.

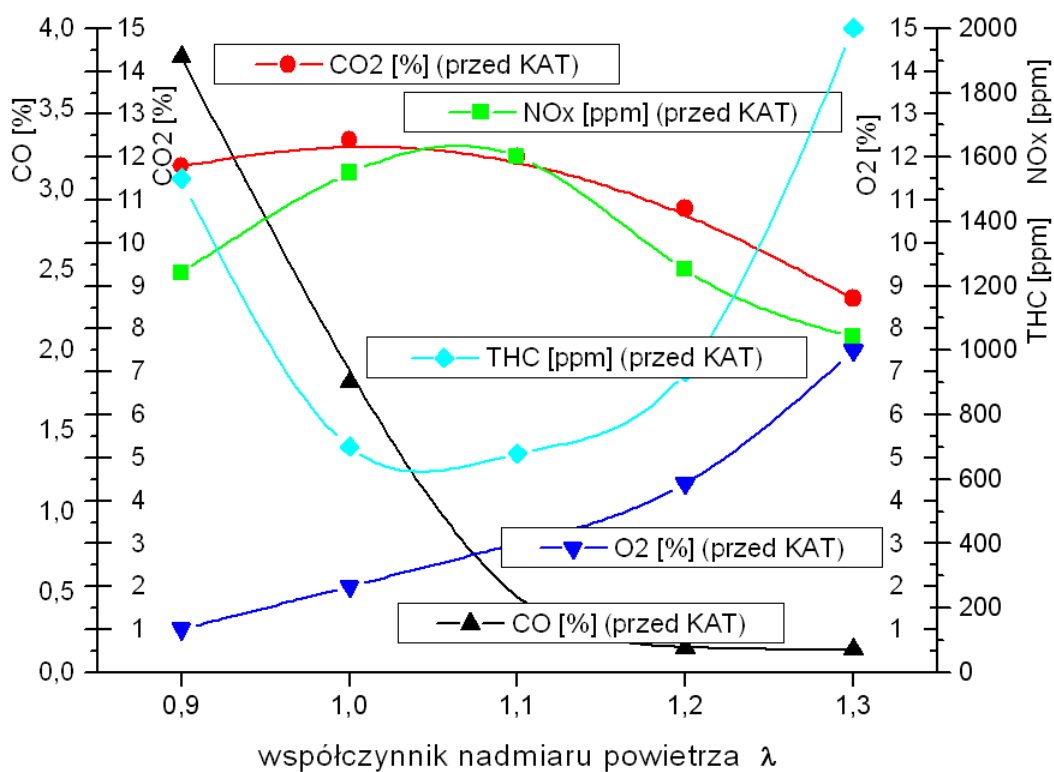
Z wykresów wynika, że największa sprawność konwersji składników spalin w reaktorze jednocześnie dla NO_x , CO oraz HC wypada dla współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda \sim 1$. Dla $\lambda = 1.1$ drastycznie spadają możliwości redukcji NO_x . W przypadku zasilania silnika propanem butanem mniejsza jest sprawność konwersji węglowodorów przy wszystkich badanych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza, a sprawność konwersji CO maleje, wraz ze stopniem zubożenia mieszanki.



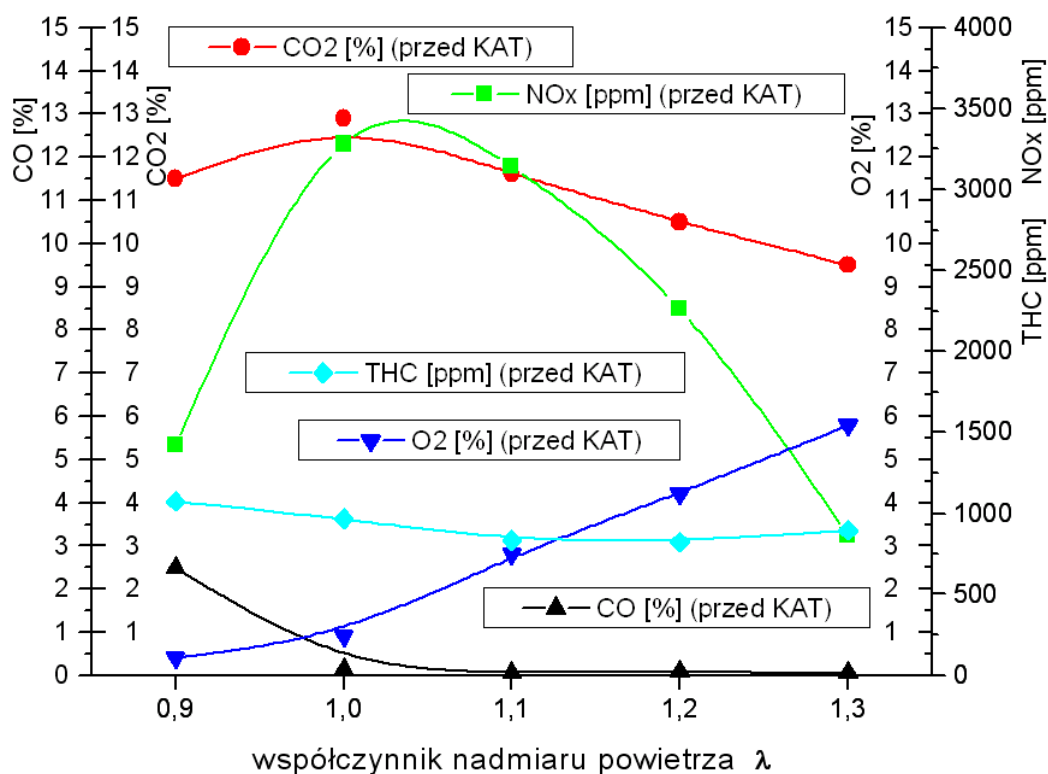
Rys. 4.1. Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki silnika zasilanego benzyną



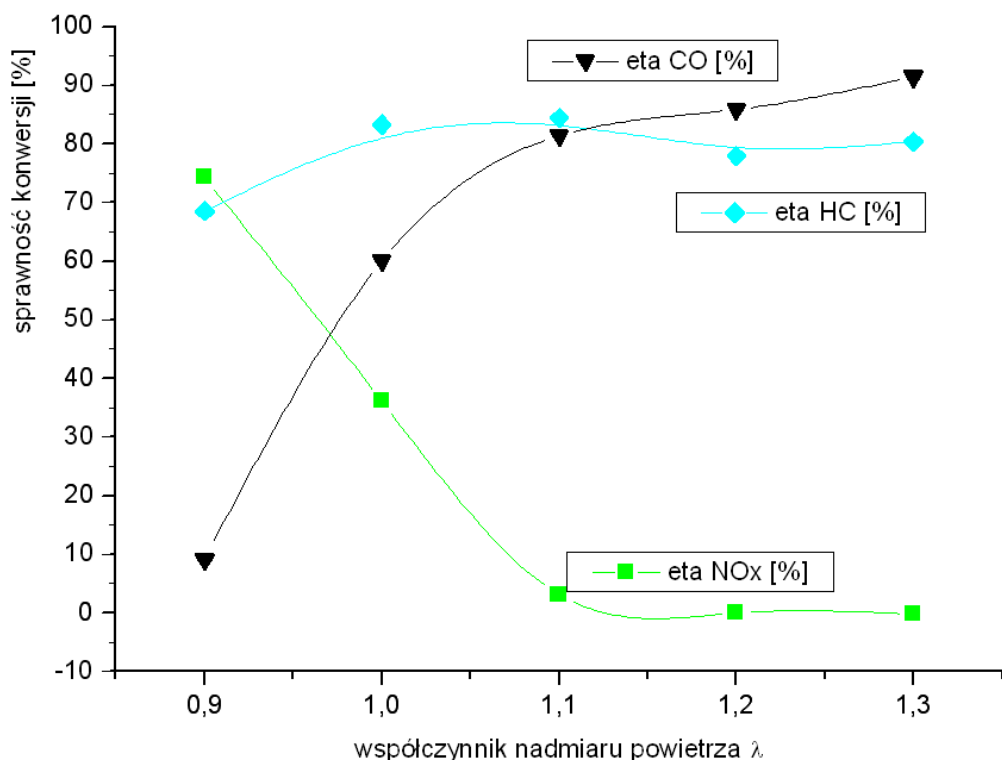
Rys. 4.2. Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki silnika zasilanego propanem-butanem



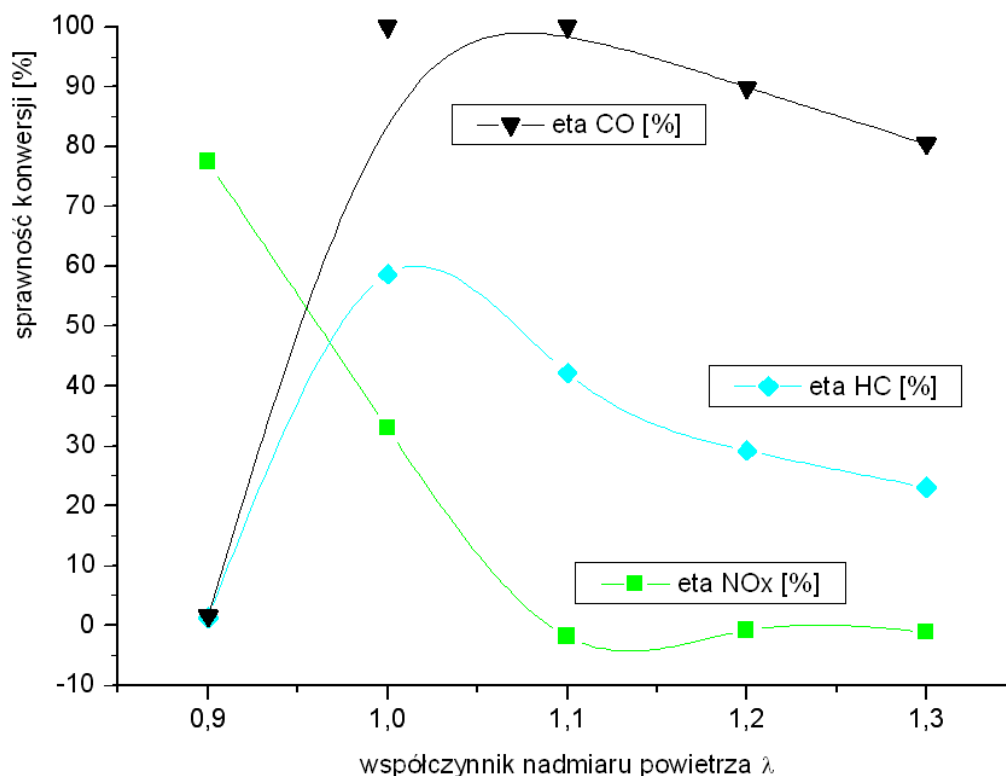
Rys. 4.3. Stężenie toksycznych składników spalin przed reaktorem katalitycznym w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ , silnika ZI zasilanego benzyną.



Rys.4.4. Stężenie toksycznych składników spalin przed reaktorem katalitycznym w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ , silnika ZI zasilanego propanem-butanem.



Rys 4.5. Sprawność konwersji toksycznych składników spalin w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza w reaktorze trójfunkcyjnym zastosowanym w silniku ZI zasilanym benzyną.



Rys 4.6. *Sprawność konwersji toksycznych składników spalin w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza w reaktorze trójfunkcyjnym zastosowanym w silniku ZI zasilanym propanem-butanem.*

Z przedstawionych wykresów wynika, że zasilanie silnika mieszanką propanu-butanu z powietrzem, w przedziale współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1.1 - 1.2$ umożliwia uzyskanie najmniejszego jednostkowego zużycia paliwa. Przy wykorzystaniu ogólnie stosowanego w motoryzacji katalitycznego reaktora trójfunkcyjnego (TWC), uzyskuje się dobrą sprawność konwersji niespalonych węglowodorów oraz tlenku węgla w środowisku spalin bogatych w tlen. Słaba konwersja tlenków azotu przez katalityczny reaktor trójfunkcyjny przy stosowaniu mieszanek o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda > 1$, wymaga poszukiwań metod redukcji NO_x przy spalaniu mieszanek ubogich.

5. Teza i cele pracy

Stosowany we współczesnych silnikach z zapłonem iskrowym trójfunkcyjny reaktor katalityczny TWC pracuje prawidłowo w przypadku zachowania ilościowej równowagi pomiędzy reagentami, występującej przy stechiometrycznym składzie mieszanki paliwowo-powietrznej t.j. $\lambda \approx 1$. Zmiana składu mieszanki na nieco uboższą w paliwo ($\lambda = 1.1 - 1.15$) pozwala zwiększyć ogólną sprawność silnika. Wiąże się to ze zmniejszeniem jednostkowego zużycia paliwa. Niestety w takich warunkach katalityczny reaktor trójfunkcyjny cechuje bardzo mała sprawność konwersji NO_x .

Stosowanie mieszanki ubogiej, sprzyjającej uzyskaniu większej sprawności ogólnej silnika, dotyczy przede wszystkim pracy przy częściowych obciążeniach silnika. Przy pełnym obciążeniu silnik zasilany jest mieszanką stechiometryczną, lub wzbogaconą w celu uzyskania większej mocy silnika. Zastosowanie katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x lub układu - katalityczny reaktor magazynujący i katalityczny reaktor trójfunkcyjny, pozwala na zasilanie silnika mieszanką o składzie odpowiadającym największej wartości sprawności ogólnej silnika.

Usuwanie NO_x z części magazynującej może być realizowane przez dostarczanie środka redukującego w postaci związków węglowodorowych. Mogą one pochodzić z dodatkowego źródła lub można wykorzystać produkt niecałkowitego spalania będący częścią spalin opuszczających silnik.

Biorąc to pod uwagę można postawić tezę pracy:

***Zasilanie ubogą mieszanką propanu - butanu z powietrzem w silniku spalinowym
ZI wyposażonym w katalityczny reaktor magazynujący w układzie wylotowym,
umożliwia zwiększenie sprawności ogólnej silnika przy niezwiększonej emisji tlenków
azotu w spalinach***

Aby udowodnić powyższą tezę należy przeprowadzić badania w celu:

- ***określenia sprawności silnika***

W tym punkcie badań będą wykonane regulacyjne charakterystyki silnika określające zużycie jednostkowe paliwa w zależności od składu mieszanki powietrzno-paliwowej.

- **określenia sprawności konwersji reaktora magazynującego przy różnych sposobach dawkowania węglowodorów.**

W obszarach największej sprawności silnika będą wykonane pomiary określające stopień konwersji szkodliwych składników spalin przez katalityczny reaktor magazynujący. Jako środek redukujący zostaną wykorzystane węglowodory w postaci ciągłego strumienia propanu-butanu dostarczane do układu wylotowego, a pochodzące z dodatkowego źródła.

- **określenia sprawności konwersji katalitycznego reaktora magazynującego przy cyklicznej zmianie składu mieszanki z ubogiej na bogatą w różnych proporcjach czasu.**

Katalityczny reaktor magazynujący przystosowany jest do pracy cyklicznej. Z tego względu przeprowadzone zostaną badania określające sprawność konwersji reaktora magazynującego w różnych proporcjach trwania cykli oczyszczania i magazynowania. W wyniku badań zostanie określona całkowita sprawność energetyczna silnika pracującego na mieszance propanu-butanu z powietrzem przy cyklicznej zmianie wartości współczynnika nadmiaru powietrza.

Do przeprowadzenia powyższego należy uprzednio zrealizować następujące zadania:

- **opracowanie systemu zasilania silnika propanem-butanem.**

Dla przeprowadzenia badań konieczne było wyposażenie silnika w system zasilania propanem-butanem. Ze względu na wymagania dotyczące dokładności regulacji składu mieszanki nie może to być układ mieszalnikowy. W celu uzyskania jak największej precyzji sterowania dawką oraz możliwości pracy sekwencyjnej, należało zastosować system z wtryskiwaniem paliwa. Na stanowisku zainstalowany został układ jednopunktowego wtrysku ciekłego propanu-butanu do kolektora dolotowego.

- **opracowanie systemu dawującego węglowodory przed katalityczny reaktor magazynujący.**

Do określenia sprawności katalitycznego reaktora magazynującego przy ciągłym strumieniu węglowodorów dostarczanych do układu wylotowego, konieczne było zbudowanie systemu dawującego. System ten ma dostarczać i sterować ilością propanu-butanu wtryskiwanego przed katalityczny reaktor magazynujący.

- ***opracowanie systemu sterowania pracą wtryskiwaczy benzyny oraz propanu –butanu zasilającego silnik, z pomiarem wielkości otwarcia przepustnicy oraz wartości kąta wyprzedzenia zapłonu wraz z możliwością programowania sekwencji wartości parametrów.***

Podstawowym celem badań było określenie sprawności układu oczyszczania spalin z wykorzystaniem katalitycznego reaktora magazynującego pracującego w cyklach - magazynowanie tlenków azotu, oraz oczyszczanie z tlenków azotu. W tym celu należało zbudować system sterujący układem zasilania umożliwiającą sekwencyjną zmianę składu mieszanki przy utrzymaniu stałej wartości momentu obrotowego.

- ***opracowanie programów narzędziowych do monitoringu i akwizycji danych z pomiarów toksycznych składników spalin.***

Ze względu na zmianę parametrów pracy silnika oraz składu spalin w funkcji czasu konieczne było zbudowanie narzędzi programistycznych umożliwiających podgląd, archiwizację oraz analizę zmiennych wartości mierzonych podczas badań.

6. Program badań doświadczalnych oraz stanowisko pomiarowe

6.1. Program badań doświadczalnych

Program badań doświadczalnych obejmował w kolejności:

1. Przygotowanie obiektu badań.
 - wyposażenie silnika w układ zasilania benzyną,
 - wyposażenie silnika w układ zasilania propanem-butanem,
 - wykonanie układu do sterowania otwarciem przepustnicy,
 - zainstalowanie w układzie wylotowym katalitycznego reaktora magazynującego tlenki azotu oraz katalitycznego reaktora zeolitowego,
 - zainstalowanie układu dawującego dodatkowe węglowodory w postaci propanu-butanu do układu wylotowego przed reaktorem.
2. Przygotowanie stanowiska pomiarowego
 - przygotowanie analizatora spalin Horiba MEXA 1500 – rozbudowanie o dodatkowy system akwizycji danych,
 - zainstalowanie systemu poboru próbek spalin w różnych miejscach układu wylotowego,
 - wykonanie układu do pomiaru temperatury,
 - zainstalowanie układu do pomiaru zużycia paliwa,
 - wykonanie komputerowego systemu sterowania silnikiem,
 - stworzenie oprogramowania pomiarowego i sterującego.
3. Przeprowadzenie badań silnikowych z doprowadzaniem ciągłego strumienia węglowodorów w postaci propanu-butanu przed katalityczny reaktor zeolitowy przy zasilaniu silnika propanem-butanem.
4. Przeprowadzenie badań z doprowadzaniem ciągłego strumienia węglowodorów w postaci propanu-butanu przed katalityczny reaktor magazynujący przy zasilaniu silnika propanem-butanem.
5. Wykonanie charakterystyk regulacyjnych jednostkowego zużycia paliwa przez silnik w zależności od zmiany współczynnika nadmiaru powietrza λ .
6. Przeprowadzenie badań silnika z wykorzystaniem katalitycznego reaktora magazynującego przy zasilaniu mieszkanką propanu-butanu z powietrzem o cyklicznie zmieniającym się składzie.

6.2. Stanowisko badawcze

Dla osiągnięcia założonych celów i zbadania słuszności postawionej tezy przeprowadzono badania w hamowni silnikowej w Zakładzie Silników z Zapłonem Iskrowym w Instytucie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

Dla potrzeb badań przygotowano stanowisko badawcze wyposażone w specjalistyczną aparaturę pomiarową. Urządzenia do realizacji przedstawionego celu badań zostały przystosowane lub zbudowane przez autora.

Stanowisko zapewniało pomiary głównych wielkości takich jak:

- zużycie paliwa,
- stężenie toksycznych składników spalin pobieranych w trzech różnych miejscach układu wylotowego silnika

Głównymi parametrami wejściowymi były :

- prędkość obrotowa silnika,
- moment obrotowy,
- współczynnik nadmiaru powietrza (λ),
- długość sekwencji wtrysku zmiennych dawek paliwa do kanału dolotowego.

Dodatkowe wielkości rejestrowane:

- czas otwarcia wtryskiwaczy dawkujących paliwo (benzynę i propan-butan)
- temperatura w dziesięciu punktach silnika, m.in.:
 - temperatura paliwa,
 - temperatura powietrza dolotowego,
- stopień otwarcia przepustnicy,
- przebieg ciśnienia wewnątrz komory spalania.

Dodatkowe wielkości wejściowe:

- czas otwarcia wtryskiwacza dawkującego paliwo (benzynę i propan-butan)
- kąt wyprzedzenia zapłonu,
- napięcie zasilania wtryskiwacza dawkującego paliwo do silnika,
- ciśnienie i temperatura paliwa w układzie paliwowym,
- stopień otwarcia przepustnicy,
- temperatura powietrza dolotowego.

Dodatkową, ale istotną cechą systemu pomiarowego jest możliwość wizualizacji czasowych przebiegów oraz rejestrowania mierzonych wielkości w czasie badań.

Schemat ideowy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 6.1. (wkładka).

Stanowisko badawcze składa się z trzech głównych grup urządzeń:

- silnika, jako obiektu badań,
- aparatury pomiarowej, układów zasilania benzyną i propanem-butanem, urządzeń nastawczych oraz urządzeń kondycjonujących media
- systemu komputerowego zarządzającego pracą silnika i stanowiska oraz zbierającego i przetwarzającego dane pomiarowe.

6.2.1. Obiekt badań

Obiektem badań był czterocylindrowy, czterosuwowy silnik 190.A1 o objętości skokowej 899 cm^3 . W kompletacji fabrycznej posiada elektroniczny układ jednopunktowego wtrysku benzyny do kolektora dolotowego. Silnik wyposażony był w trójfunkcyjny reaktor katalityczny wspomagany sondą lambda. Dane fabryczne silnika zostały przedstawione w tab.6.1.

Model silnika	190.A1
Typ	Wolnossący, czterosuwowy, benzynowy
Liczba cylindrów	4
Pojemność skokowa	899 cm ³
Liczba zaworów na cyl.	2
Liczba świec na cyl.	1, typ 95
Zasilanie	Benzynowe, elektroniczny jednopunktowy wtrysk do kolektora dolotowego, nad przepustnicą
Rodzaj paliwa	Benzyna bezołowiowa 91 – 95
Moc znamionowa	31 kW przy 4500 obr./min
Moment znamionowy	62 Nm przy 3200 obr/min
Max. Prędkość obrotowa	6000 obr./min.
Zużycie paliwa	min. 257 g/kWh
Jednostka sterująca	Magneti-Marelli RT4357-4
Wyposażenie dodatkowe	Trójfunkcyjny reaktor katalityczny, dwustanowa sonda lambda

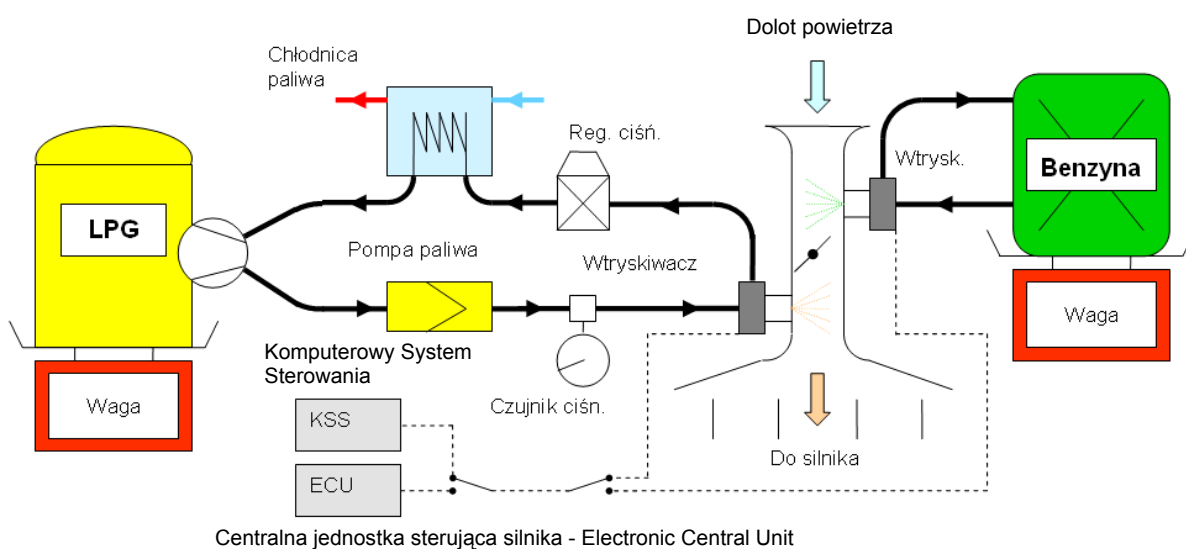
Tab.6.1 Dane techniczne badanego silnika



Rys.6.2. Widok ogólny stanowiska badawczego.

W silniku o fabrycznej kompletacji, aby przygotować go do badań, dokonano kilku zmian. Główną modyfikacją było zastosowanie instalacji umożliwiającej zasilanie silnika propanem-butanem.

6.2.2. Układ zasilania silnika



Rys.6.3. Układ zasilania silnika propanem-butanem albo benzyną.

Przedstawiony na rysunku 6.3. układ umożliwia zasilanie silnika benzyną oraz propanem-butanem. Układ zasilania benzyną oraz propanem-butanem realizują niezależne systemy.

Układ zasilania benzyną składał się z elementów wchodzących w skład fabrycznego wyposażenia silnika. Jednopunktowy wtryskiwacz benzyny znajdował się w kolektorze dolotowym nad przepustnicą. Zbiornik paliwa umiejscowiony był na wadze elektronicznej i na podstawie jej wskazań dokonano pomiarów potrzebnych do określenia godzinowego zużycia paliwa.

Układ zasilania propanem-butanem składał się z pompy paliwa o podwyższonym ciśnieniu tłoczenia do 8 barów, czujnika ciśnienia w układzie, regulatora ciśnienia, chłodnicy paliwa oraz wtryskiwacza ciekłego propanu-butanu do kolektora dolotowego.

Ciśnienie pary nasyconej w butli w temperaturze 25 °C wynosi ok. 5 barów. Ze względu na nagrzewanie się wtryskiwacza od kolektora dolotowego, w okolicy iglicy mogą się pojawiać korki parowe. Powstają one na skutek zwiększania ciśnienia pary nasyconej ze wzrostem temperatury, do poziomu wyższego od panującego w przewodach zasilających. Zaburzają one przepływ cieczy przez otwór wtryskiwacza powodując znaczny spadek wydatku paliwa. W tym celu w obwodzie zasilania zastosowano pompę paliwa zwiększającą ciśnienie o 3 bary. Stosowanie wyższego ciśnienia mogłoby uniemożliwić pracę wtryskiwacza ze względu na przekroczenie jego parametrów roboczych. Ciśnienie robocze paliwa wynosiło ok. 8 bar.

Ze względu na niewielką (max. 10 l) ilość paliwa w zamkniętym obwodzie następowało jego nagrzewanie podczas przepływania przez wtryskiwacz. Zastosowanie chłodnicy umożliwiała utrzymanie stałej temperatury paliwa w zakresie 15-25 °C.

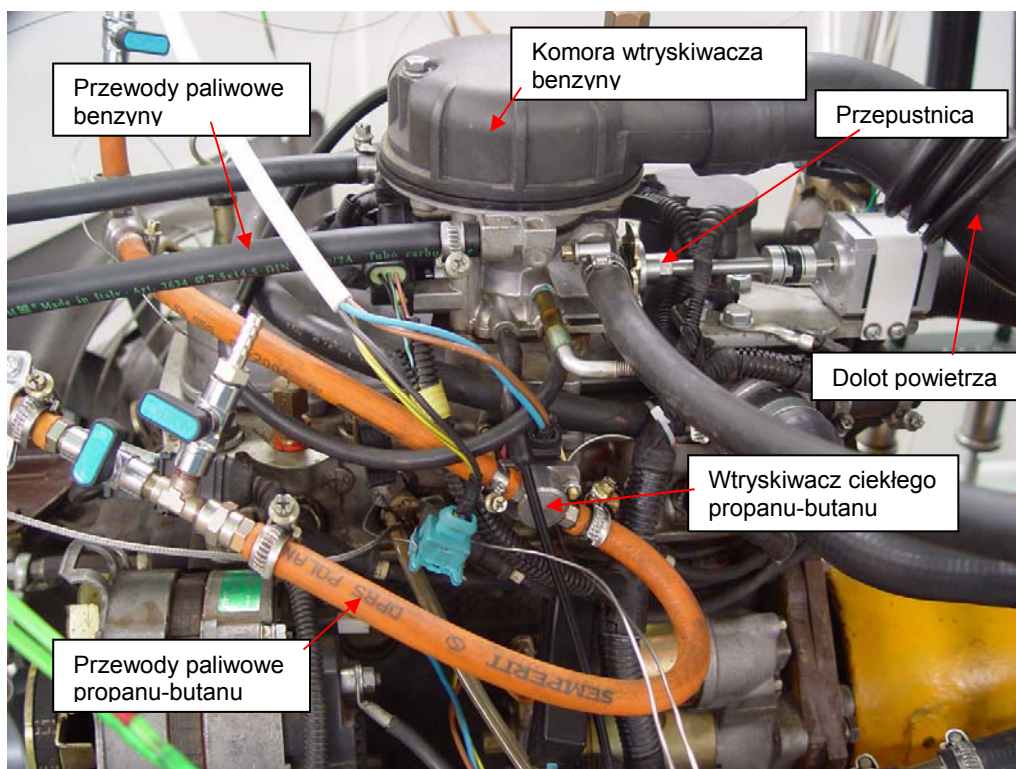
Instalacja posiadała możliwość podłączenia zewnętrznego zbiornika paliwa.

Wtryskiwacz do zasilania gazowego to element stosowany w systemach wielopunktowego wtrysku benzyny. Umieszczenie wtryskiwacza gazowego pod przepustnicą uniemożliwia jej oblodzenie. Obładanie spowodowane jest gwałtownym schładzaniem ładunku wynikającym z odparowywania paliwa. Butla z ciekłym propanem-butanem znajdowała się na wadze elektronicznej co umożliwiało pomiar zużycia paliwa.

Paliwo gazowe na potrzeby badań było komponowane w proporcjach masowych 50/50 z technicznie czystego propanu i butanu. Głównym powodem wykorzystywania takiego paliwa był fakt, że w propanie-butanie dostępnym powszechnie na stacjach benzynowych stosuje

się nawaniacze ze związkami siarki. Siarka ma negatywny wpływ na pracę reaktora magazynującego tlenki azotu.

Wtryskiwacz benzyny mógł być sterowany z kontrolera silnika (ECU), w który był fabrycznie wyposażony silnik, lub z Komputerowego Systemu Sterowania (KSS) umożliwiającego dokładną kontrolę czasu otwarcia wtryskiwacza. Wtryskiwacz gazu pracował jedynie w połączeniu z KSS. Istniała możliwość przełączania układu sterującego wtryskiwaczem benzyny podczas pracy silnika. Również możliwa była zmiana rodzaju paliwa podczas pracy silnika (rys.6.4).

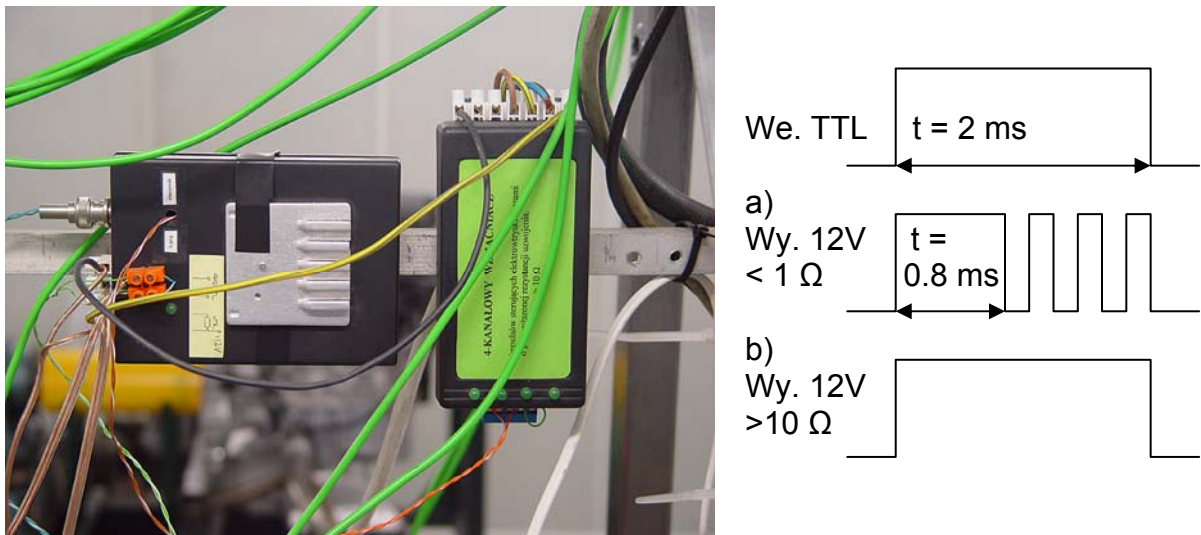


Rys. 6.4. Rozmieszczenie wtryskiwaczy.

Wzmacnianie i formowanie sygnału sterującego wtryskiwaczy odbywało się w odpowiednich układach wzmacniaczy sygnału. Ze względu na różnice w sterowaniu wtryskiwaczami wymagały one różnego rodzaju wzmacniaczy. Wtryskiwacz fabryczny służący do wtrysku jednopunktowego posiada małą rezystancję (ok. 0.5Ω). Ze względu na duży prąd płynący przez cewkę i związaną z tym wydzielaną moc wymagane było odpowiednie kształtowanie sygnału elektrycznego. Na rys. 6.5 a) przedstawiono kształt sygnału składającego się z dwu faz. Pierwsza faza mająca stałą długość i trwająca 0.8 ms zasilala wtryskiwacz stałym napięciem 12V. Zadaniem tej fazy jest pewne oraz możliwie najszybsze podniesienie iglicy wtryskiwacza. Długość drugiej fazy jest różnicą czasu

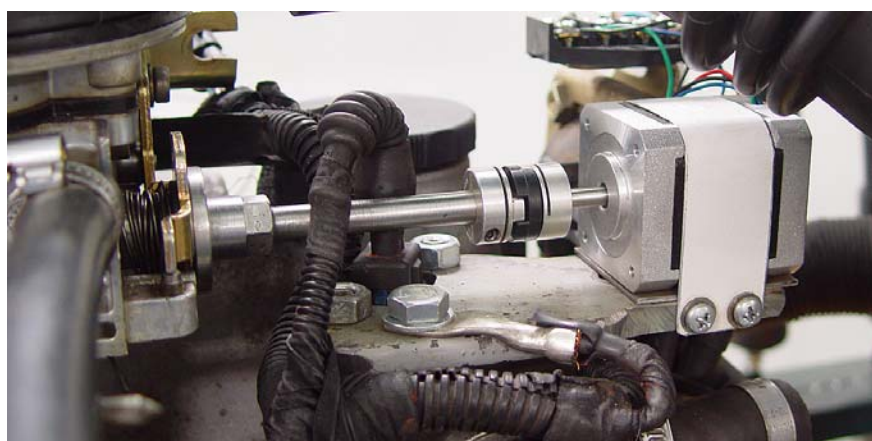
otwarcia wtryskiwacza i czasu trwania pierwszej fazy. W jej trakcie wtryskiwacz zasilany jest sygnałem prostokątnym 12V o wysokiej częstotliwości. Zadaniem tej fazy jest podtrzymanie iglicy w stanie otwartym przy jednoczesnym zmniejszeniu strat mocy na uzwojeniu.

Wtryskiwacz gazu, pochodzący z instalacji wielopunktowego wtrysku posiadał inne parametry elektryczne. Ze względu na wysoką rezystancję cewki (ok. 15 Ω) wtryskiwacz mógł być sterowany stałym napięciem 12V. Rys. 6.5 b)



Rys. 6.5. Klucze tranzystorowe służące do sterowania wtryskiwaczem oraz obwiednia sygnału dla wtryskiwaczy niskoomowych a) i wysokoomowych b).

Do sterowania obciążeniem silnika służyła przepustnica napędzana bipolarnym silnikiem krokowym, który sterowany był zbudowanym przez autora kontrolerem.



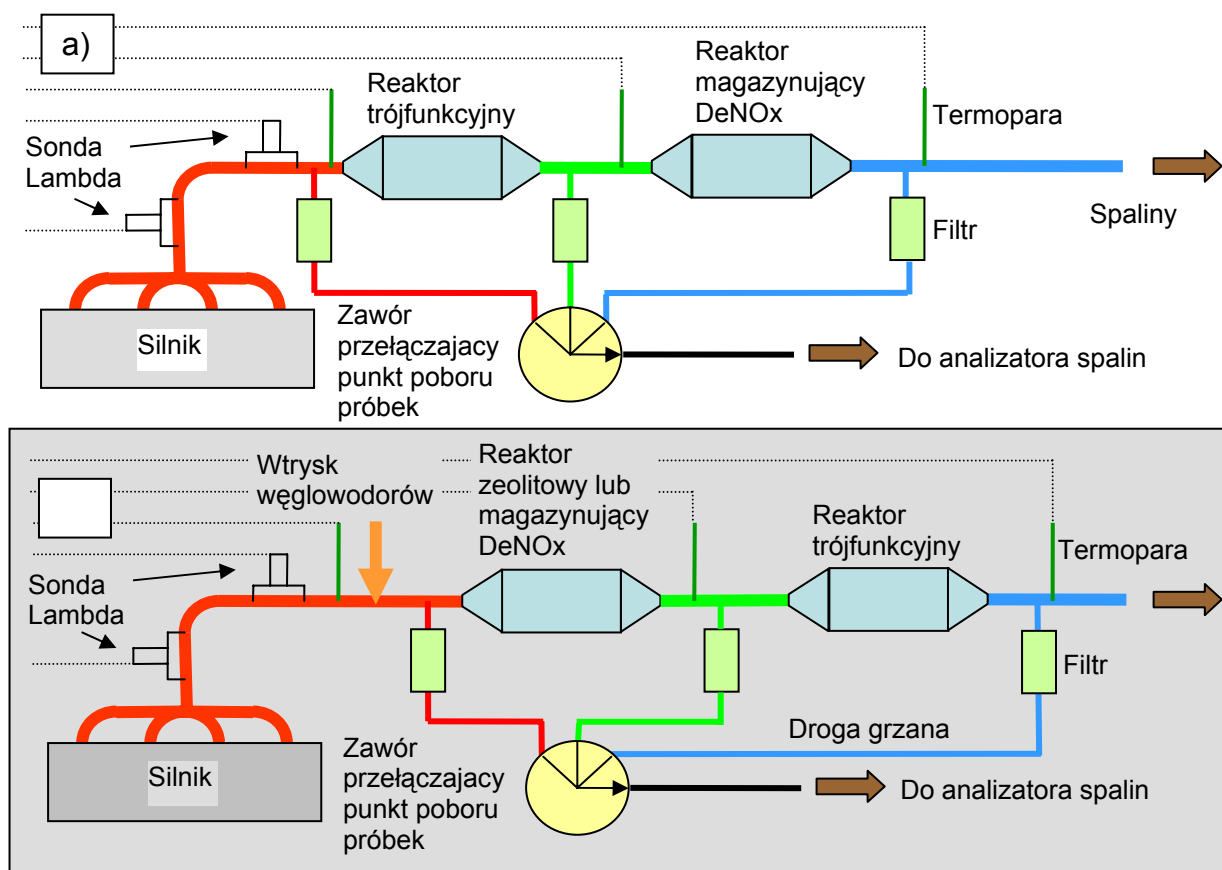
Rys. 6.6. Silnik krokowy sterujący otwarciem przepustnicy.

Umożliwiał on zadawanie wartości otwarcia przepustnicy w procentach. Kontroler miał możliwość zdalnego zadawania wartości otwarcia przepustnicy przez KSS. Dzięki temu, w

trybie automatycznym, układ sterujący, poprzez odpowiednie uchylanie przepustnicy oraz czas otwarcia wtryskiwaczy utrzymywał zadaną wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz momentu obrotowego silnika.

6.2.3. Układ wylotowy silnika

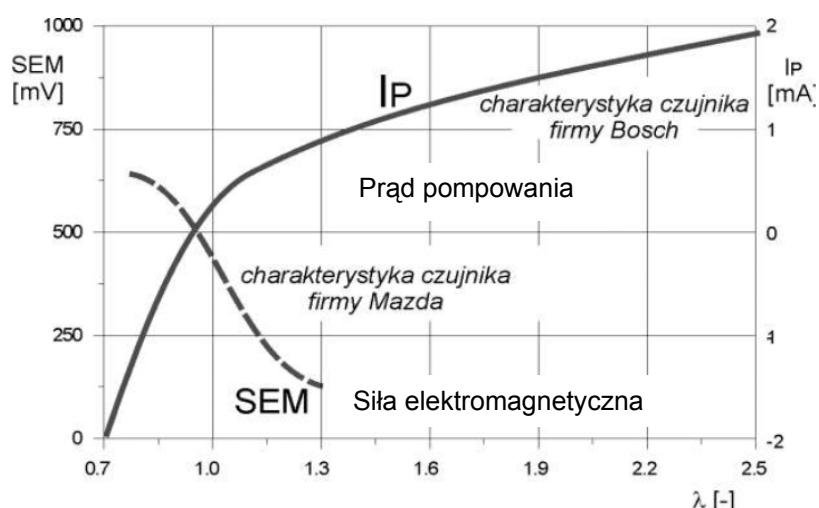
Do budowy układu wylotowego wykorzystano elementy układu fabrycznego. Seryjne wyposażenie silnika obejmowało sondę Lambda i katalityczny reaktor trójfunkcyjny. W kompletacji przygotowanej do badań układ wylotowy rozbudowano o dodatkową, proporcjonalną sondę Lambda oraz katalityczny reaktor magazynujący (rys.6.7.a). W trakcie badań wstępnych stosowany był także katalityczny reaktor zeolitowy (rys.6.7.b)



Rys. 6.7. Schemat układu wylotowego silnika, a) kompletacja do badań zasadniczych, b) kompletacja do badań wstępnych.

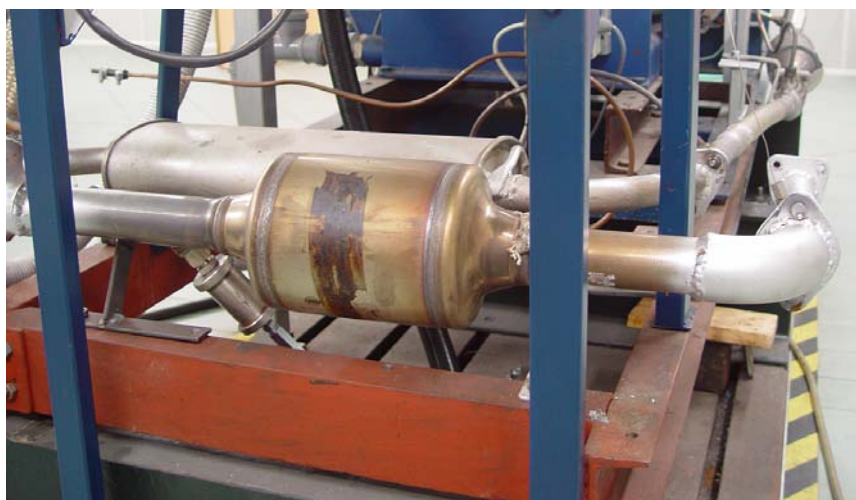
Proporcjonalna sonda Lambda umożliwia kontrolę składu spalin bez opóźnienia związanego z długością dróg pomiarowych oraz reakcji detektorów analizatora spalin. Jej sygnał wykorzystywany może być do ustalania aktualnej dawki paliwa w układzie sterującym

silnika przy założonej wartości współczynnika nadmiaru powietrza. Sonda Lambda opiera się na działaniu ogniwa Nernsta. Sygnał prądowy (lub napięciowy) proporcjonalnej sondy Lambda, wynikający z zawartości tlenu w spalinach, jest proporcjonalny do współczynnika nadmiaru powietrza. Charakterystyka prądu proporcjonalnej sondy Lambda w zależności od składu spalin przedstawiona została na rys. 6.8. Sonda reaguje w szerokich granicach współczynnika λ oraz charakteryzuje się natychmiastową reakcją.



Rys.6.8. Charakterystyka prądowa proporcjonalnej sondy Lambda.

W badaniach używano dwóch katalitycznych reaktorów magazynujących. Pierwszy z nich, wykorzystany w trakcie badań z użyciem ciągłego strumienia węglowodorów doprowadzonych przed reaktor katalityczny został wyprodukowany przez koncern PSA. W reaktor ten wyposażane są silniki HPI Citroen, Peugeot. Do badań z cykliczną zmianą składu mieszanki użyto reaktora magazynującego koncernu VW stosowanego w silnikach FSI (rys. 6.9).



Rys.6.9. Reaktor magazynujący firmy VW.

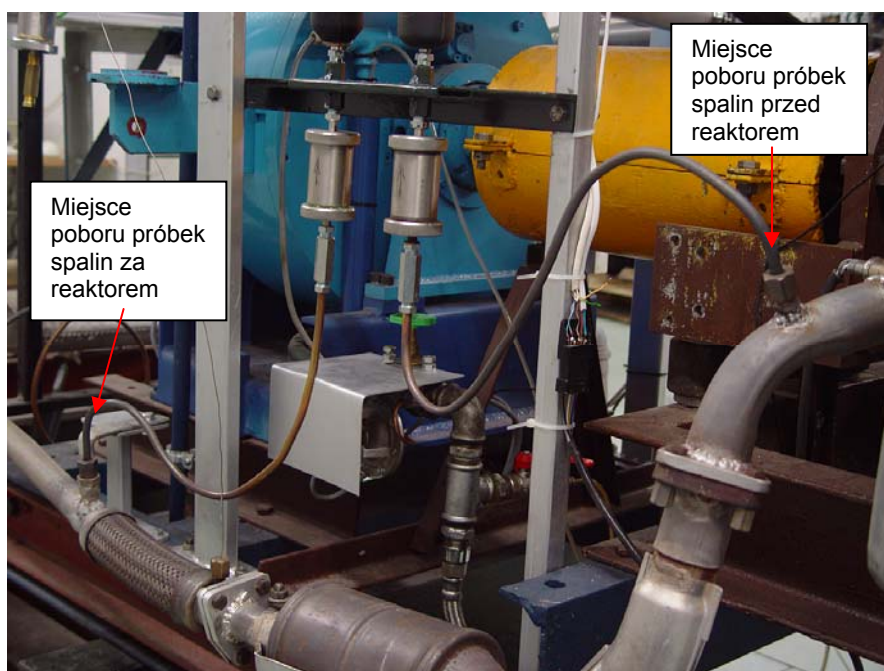
Reaktor FSI był reaktorem fabrycznie nowym i pracował jedynie na komponowanym w laboratorium, czystym technicznie, paliwie gazowym. Uniknięto w ten sposób pogorszenia właściwości reaktora związanego z ewentualnym zużyciem i zasiarczeniem.

W badaniach z użyciem ciągłego strumienia węglowodorów używano także katalitycznego reaktora zeolitowego (rys.6.7.b)

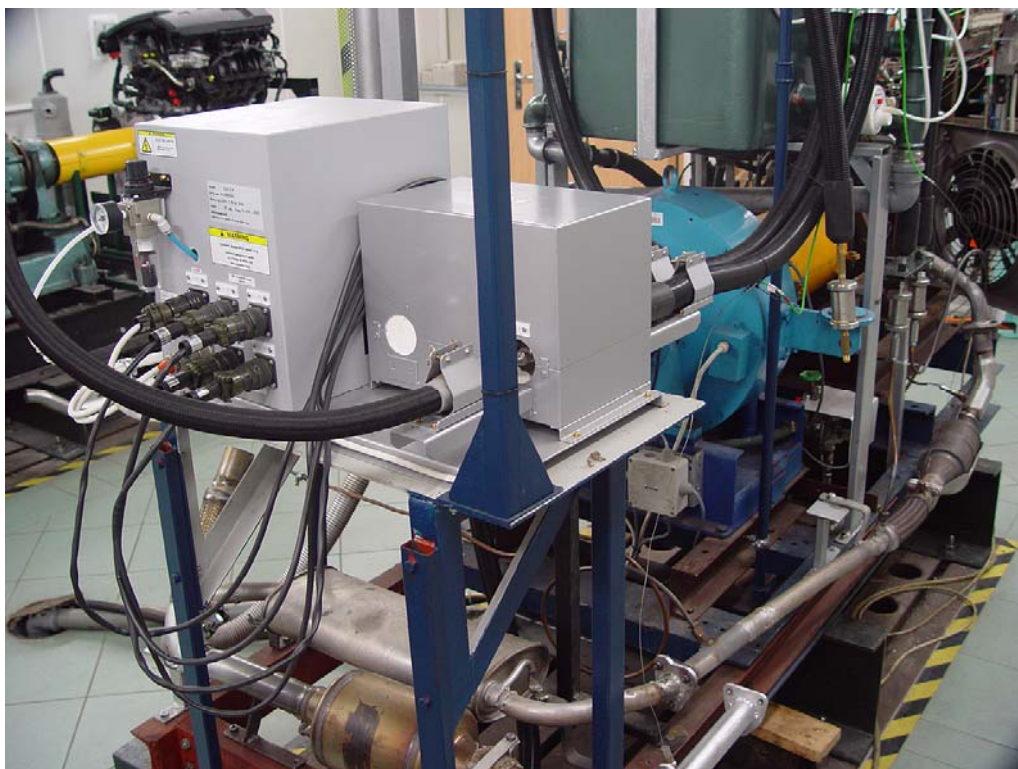
W celu kontrolowania stanu termicznego reaktorów w układzie wylotowym zainstalowano termopary. Pomiar temperatury przed katalitycznym reaktorem trójfunkcyjnym i przed katalitycznym reaktorem magazynującym określał zakres ich prawidłowej pracy. Dodatkowo zainstalowano termoparę za katalitycznym reaktorem trójfunkcyjnym. Podwyższona temperatura na wyjściu reaktora względem wejścia świadczyła o reakcji spalania węglowodorów i tlenu węgla w reaktorze.

Pobór próbek spalin dokonywany był w trzech miejscach układu wylotowego – przed katalitycznym reaktorem trójfunkcyjnym, za katalitycznym reaktorem trójfunkcyjnym oraz za katalitycznym reaktorem magazynującym. Spaliny były wstępnie odfiltrowane z cząstek stałych (rys. 6.10.)

Do przełączania miejsca poboru próbek doprowadzanych do analizatora spalin, służył dedykowany system elektromagnetycznych zaworów (rys. 6.11).



Rys. 6.10 Układ poboru spalin przed i za reaktorem trójfunkcyjnym ze wstępnym filtrowaniem.



Rys.6.11. System elektropneumatycznych zaworów przełączających miejsce poboru próbki.

6.2.4. Hamulec silnikowy

Do obciążania silnika wykorzystano elektrowirowy hamulec silnikowy AMX-212. W połączeniu z Komputerowym Systemem Sterowania (KSS) możliwe było dokładne utrzymywanie stałej wartości momentu obrotowego silnika przy zmiennych parametrach regulacyjnych $f(\lambda, \alpha)$ gdzie:

$\lambda = f(t, \alpha_p)$ – skład mieszanki będący funkcją czasu otwarcia wtryskiwacza oraz uchylenia przepustnicy,

t – czas otwarcia wtryskiwacza,

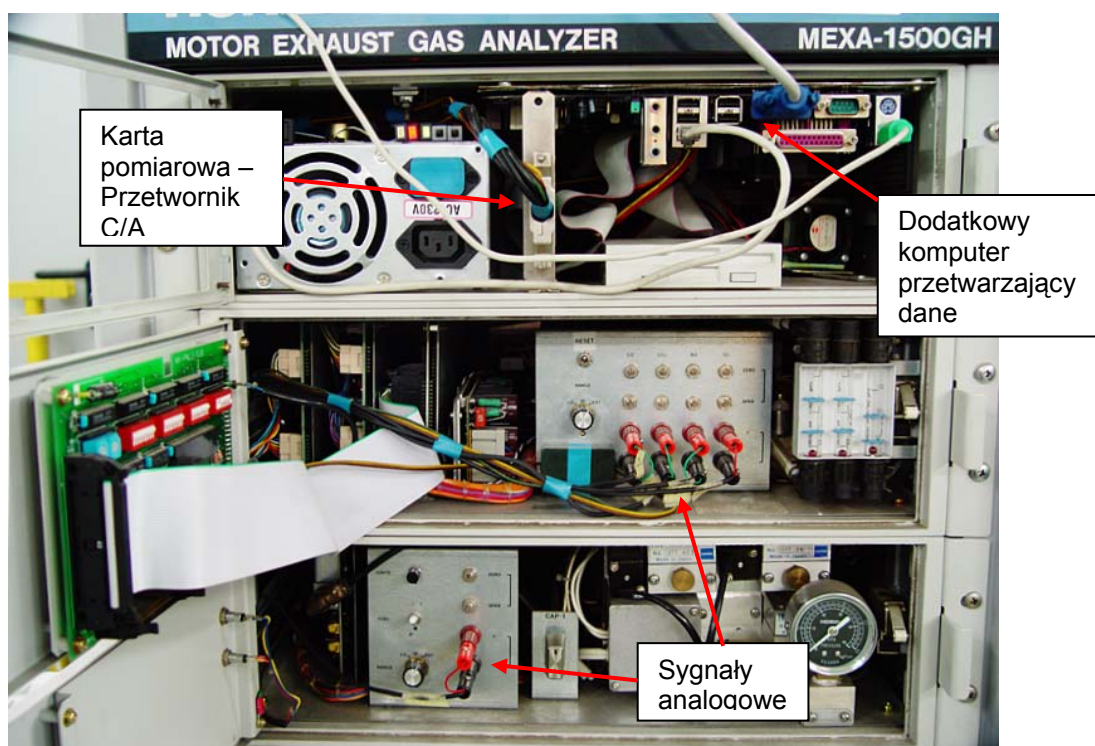
α – kąt wyprzedzenia zapłonu,

α_p – stopień uchylenia przepustnicy.

6.2.5. Analizator spalin

Do określenia składu chemicznego spalin służył analizator spalin Horiba Mexa 1500 GH. Mierzono stężenie CO , CO_2 , O_2 , NO_x oraz THC. Pomiar CO , CO_2 oraz NO_x dokonany był w oparciu o metodę NDIR, natomiast THC o metodę FID. Pomiar zawartości tlenu odbywał się za pomocą detektora PMD.

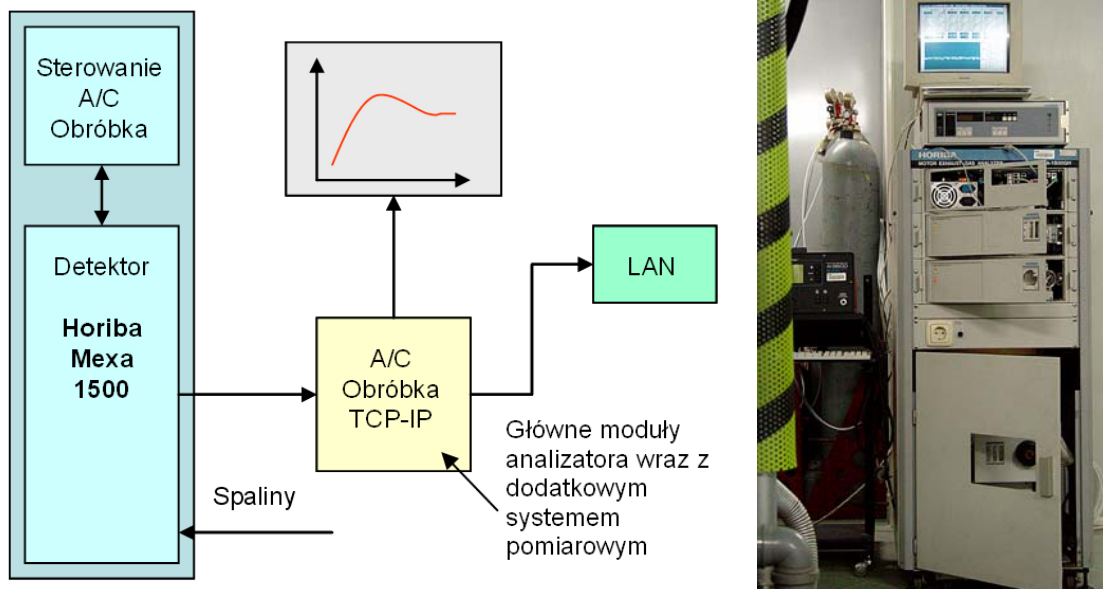
Oryginalne oprogramowanie analizatora umożliwiało przedstawianie na ekranie monitora wartości stężenia poszczególnych składników spalin w postaci liczbowej oraz zapis na dysk aktualnych danych. Wyniki były uśredniane z wielu próbek, co w efekcie dawało spore opóźnienia odczytu. Ze względu na nieustalony przebieg zmieniającego się sekwencyjnie składu spalin, istniała potrzeba ciągłej rejestracji oraz zminimalizowania opóźnień związanych z uśrednianiem. W tym celu autor wyposażył analizator w dodatkowy system umożliwiający pomiar sygnałów elektrycznych bezpośrednio z detektorów. System składał się z zainstalowanego wewnątrz obudowy analizatora komputera obsługującego kartę przetworników analogowo cyfrowych (NI-PCI 2013) oraz odpowiedniego oprogramowania rejestrującego dane (rys. 6.12).



Rys. 6.12. Analizator Horiba MEXA 1500 z wbudowanym dodatkowym systemem pomiarowym

Dało to możliwość ominięcia systemów obróbki i uśredniania danych. Program, który obsługiwał pomiar, przeliczał zmierzone wielkości na stężenie poszczególnych składników spalin oraz na tej podstawie określał współczynnik nadmiaru powietrza λ . Przy tym rozwiązaniu jedyne opóźnienie w odczycie stężenia składników spalin wprowadzała reakcja samych detektorów, wynikająca z zasady działania. Jednak czas stabilizacji (T_{90}) nie przekraczał 5 sek (bez przesunięcia fazowego).

Zaletą dodatkowego systemu pomiarowego stężenia składników spalin była duża częstotliwość próbkowania (4 próbki/s (250 ms)). Wszystkie mierzone wielkości mogły być wyświetlane w postaci wykresu oraz były przesyłane protokołem TCP-IP do sieci LAN. Umożliwiło to podgląd wykresu z miejsca operatora oraz wygodną rejestrację na dysku serwera.



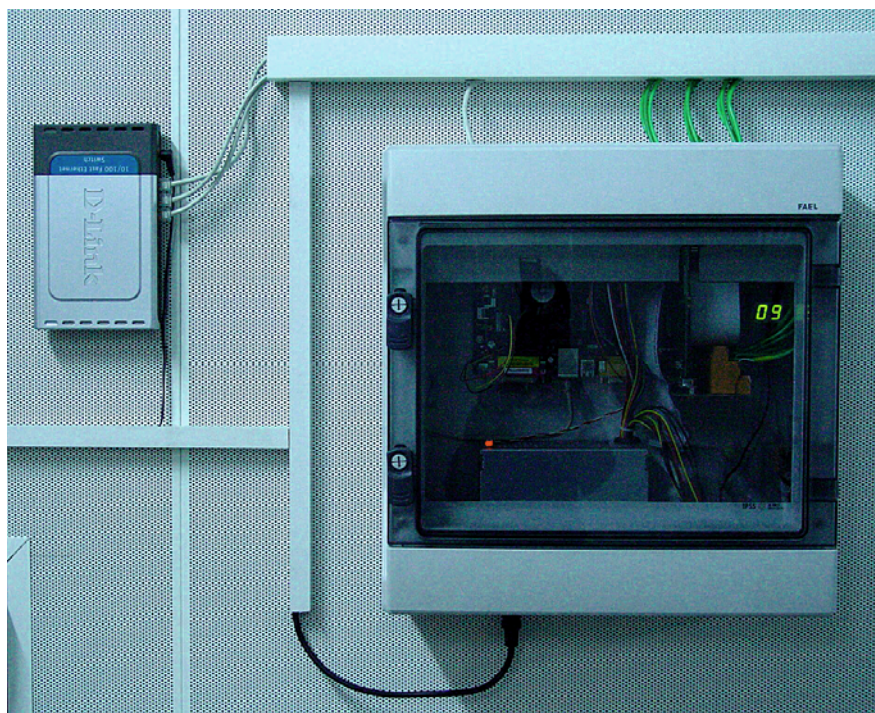
Rys. 6.13. Analizator spalin Horiba oraz schemat z dodatkowym systemem pomiarowym

6.2.6. Pomiar temperatury

W celu kontrolowania stanu cieplnego silnika został on wyposażony w kilkanaście termopar mierzących temperaturę mediów w różnych punktach m.in.:

- powietrza przed przepustnicą,
- powietrza w kanałach dolotowych,
- spalin przed i za katalitycznym reaktorem trójfunkcyjnym,
- spalin przed katalitycznym reaktorem magazynującym,
- cieczy chłodzącej,
- oleju,
- paliwa.

Do pomiaru temperatury został zaprojektowany i wykonany przez autora układ pomiarowy oparty na karcie ADDIDATA przeznaczonej do współpracy z termoparami oraz na elementach komputera klasy PC. System odpowiednio formatował dane, według założonego standardu i podobnie jak analizator spalin udostępniał je w sieci LAN.



Rys. 6.14. System do pomiaru temperatury

6.2.7. Pomiar zużycia paliwa

Pomiar zużycia paliwa realizowano metodą wagową. Jest to najbardziej bezpośredni pomiar ilości zużytego paliwa i nie wymaga korygowania do warunków normalnych (rys. 6.15).

Butla z propanem – butanem umiejscowiona była na elektronicznej wadze. W trakcie pomiaru stężenia składników spalin wykonywano również pomiar zużycia paliwa. Pomiar masy paliwa był prowadzony przez 5 minut, co dawało dużą dokładność obliczenia godzinowego zużycia paliwa.



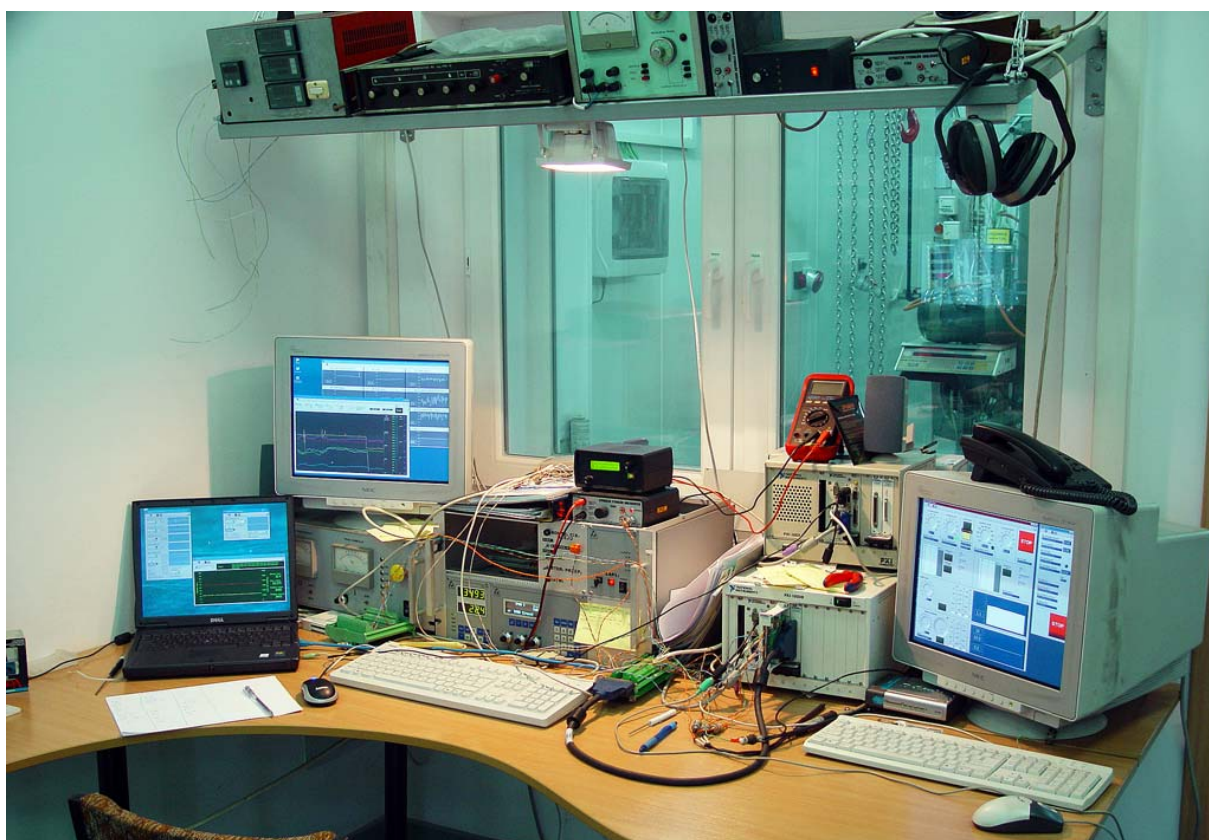
Rys. 6.15. System do pomiaru zużycia paliwa propanu-butanu oraz benzyny (niżej) za pomocą metody wagowej.

6.2.8. Komputerowy System Sterowania (KSS) i archiwizacji danych

System sterowania, obróbki, wizualizacji oraz rejestracji wyników procesów zachodzących w trakcie pomiarów usytuowano na stanowisku operatora (rys.6.16.)

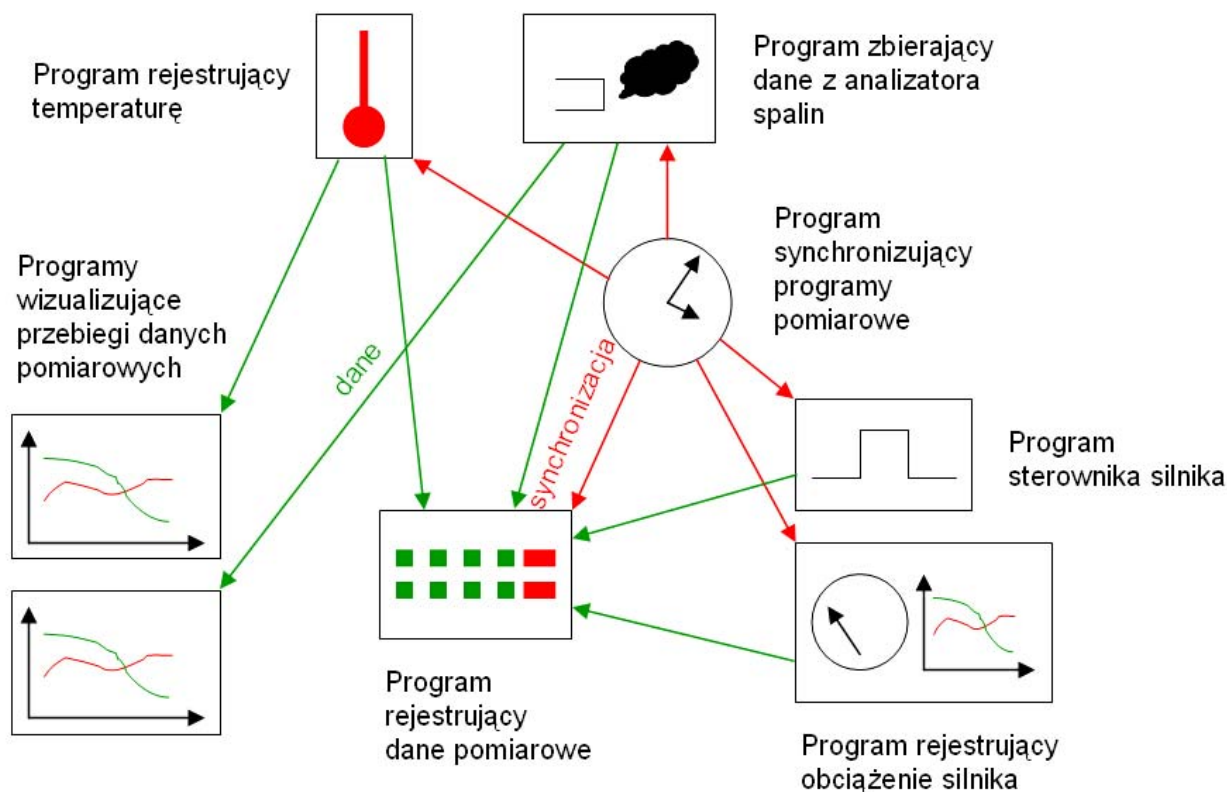
Programy zostały napisane przez autora w środowisku programowania LabVIEW Professional 7.0.

Wszystkie mierzone i zadawane wielkości system KSS pozwalał wyświetlać na monitorach. W przypadku przebiegów czasowych, jak np. stężenie toksycznych składników spalin czy temperatury, mogły one być przedstawione w formie wykresów. Dawało to możliwość bieżącej korelacji pomiędzy mierzonymi wielkościami i parametrami. Jednocześnie można było rejestrować, wybrane przez użytkownika, dane w formacie zgodnym z Excelem. Wszystkie urządzenia współpracujące na stanowisku były ze sobą synchronizowane w celu jednoznacznego przyporządkowania danych względem czasu.



Rys. 6.16. Widok ogólny stanowiska operatora

Na rys. 6.17. zamieszczono schemat przedstawiający przepływ danych między programami obsługującymi stanowisko.



Rys. 6.17. Przepływ danych pomiędzy programami obsługującymi stanowisko.

Programem synchronizującym główne programy był zegar systemu. Pozwalał on na ustawienie taktu, który stanowił podstawę czasu dla programów pomiarowych oraz dla rejestratora. Takt określał częstotliwość, z jaką były zbierane próbki, oraz przesyłane przez sieć LAN do programu rejestrującego dane. Istnieje możliwość zmiany długości taktu 100, 250 oraz 500 ms. W czasie badań stosowano 250 ms.

Rejestrator umożliwiał zapis danych w standardzie zgodnym z Microsoft Excel. W arkuszach Excel kolejne kolumny odpowiadały zapisywanemu kanałowi a wiersze bezwzględnemu czasowi pobrania próbki. Zapisywany kanał był wybierany przez użytkownika z listy dostępnych w systemie kanałów pomiarowych. Oprócz stężenia poszczególnych składników spalin czy temperatury zapisywać można było, między innymi, takie parametry jak: otwarcie przepustnicy, czas wtrysku, prędkość obrotowa, moment obrotowy (rys. 6.18).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Czas	moment	obroty	czas_wtr	I	sklad					
2	3473750	17.2	1996	1.32	0.99	328.26	11.8	0.8	2822.51	1033.9	0.01
3	3474000	17.7	2002	1.32	1.01	327.42	11.59	1.09	2789.7	1030.79	0
4	3474250	18.6	2014	1.32	1.01	326.34	11.38	1.53	2812.41	1026.24	0
5	3474500	20.1	2031	1.32	1.04	325.02	11.17	2.13	2809.35	1020.15	0
6	3474750	23.2	2067	1.32	1.04	323.44	11.03	2.65	2798.33	1013.36	0
7	3475000	25.4	2093	1.32	1.11	323.44	11.03	2.65	2798.33	1013.36	0
8	3475250	27.6	2118	1.32	1.11	321.62	10.92	3.25	2820.81	1005.07	0
9	3475500	29	2136	1.32	1.14	319.61	10.88	3.64	2808.78	994.79	0
10	3475750	30.3	2154	1.32	1.14	317.45	10.88	3.91	2811.28	983.11	0
11	3476000	31	2164	1.32	1.18	315.23	10.9	4.02	2784.48	970.61	0
12	3476250	31.2	2166	1.32	1.18	313.01	10.96	4.09	2753.94	957.82	0
13	3476500	31.2	2160	1.32	1.18	310.84	11.01	4.08	2732.71	945.24	0
14	3476750	31.2	2150	1.32	1.18	308.76	11.11	3.96	2658.69	933.31	0
15	3477000	31.2	2124	1.32	1.18	306.83	11.18	3.84	2674.47	922.39	0
16	3477250	31.2	2107	1.32	1.18	306.83	11.18	3.84	2674.47	922.39	0
17	3477500	31.5	2093	1.32	1.17	305.11	11.34	3.55	2681.73	912.8	0
18	3477750	32.2	2085	1.32	1.17	302.48	11.57	3.09	2707.17	899.29	0

Rys.6.18. Przykładowy plik Excela z zapisanymi danymi z pomiarów

Dane o stężeniu składników spalin pochodziły z programu współpracującego z analizatorem spalin Horiba MEXA 1500. Program umożliwiał kalibrację kanałów oraz obliczanie wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ dla różnych paliw.

Zadaniem programu obsługującego układ pomiaru temperatury było przeliczenie napięcia zmierzonego na poszczególnych termoparach na wartość temperatury i przesłanie tych wartości do sieci LAN.

Wizualizacja czasowych przebiegów toksycznych składników spalin oraz temperatury wykonywana była przez programy wizualizacyjne znajdujące się na stanowisku operatora. Programy umożliwiały również ustawienie progów alarmu oraz uśrednianie wykresów.

Komunikację ze sterownikiem hamulca silnikowego obsługiwał program umożliwiający wizualizację przebiegów czasowych momentu obrotowego silnika oraz prędkości obrotowej. Dane te były również udostępnione w sieci LAN jako kanały zgodne ze standardem programów pracujących w laboratorium.

Programem umożliwiającym sterowanie pracą silnika był program będący częścią sterownika silnika usytuowanego na stanowisku. Program umożliwiał ręczne zadawanie czasu otwarcia wtryskiwacza paliwa oraz automatyczne sterowanie czasem otwarcia wtryskiwacza przy zadanym współczynniku nadmiaru powietrza λ , odczytywanym z analizatora spalin lub proporcjonalnej sondy λ . W trybie pełnej automatyki program utrzymywał zadaną wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz stałą wartość momentu obrotowego silnika. W sprzężeniu zwrotnym regulatora wykorzystywano dane

pobierane z listy kanałów danych udostępnionych w sieci LAN lub na podstawie sygnału z proporcjonalnej sondy lambda. Do potrzeb badań wykorzystywana była opcja programu umożliwiająca zapisanie sekwencji czasu otwarcia wtryskiwacza oraz stopnia otwarcia przepustnicy.

Zegar systemowy	Generował czas względny będący podstawą synchronizacji programów pomiarowych. Określał czas pracy systemu oraz częstotliwość pracy, ustaloną na 4 próbki/s co dawało odczyt wartości co 250 ms.
Sterownik silnika	Służył do generowania sygnałów sterujących pracą wtryskiwaczy
Akwizycja danych z analizatora spalin Horiba	Pomiar sygnałów elektrycznych z czujników składu spalin
Pomiar temperatury	Pomiar napięcia na termoparach
Obróbka i wizualizacja przebiegu stężenia składników spalin	Umożliwiał podgląd w formie czytelnego wykresu czasowego stężenia składników spalin oraz wartości współczynnika nadmiaru powietrza. Posiadał regulowany filtr dolnoprzepustowy do wygładzania przebiegów
Zarządzanie oraz wizualizacja pomiarów temperatury	Podgląd w formie przebiegu czasowego temperatury. Umożliwiał grupowanie termopar oraz określenie stanów alarmowych, w przypadku przekroczenia górnej lub dolnej wartości temperatury
Odczyt oraz wizualizacja parametrów hamulca	Podgląd w formie przebiegu czasowego parametrów ze sterownika hamulca. Prędkość i moment zadany oraz prędkość i moment zmierzony.
Rejestrowanie danych na dysku	Program rejestrujący wybrane przez użytkownika wielkości jako ciągi danych w przypisanych zsynchronizowanych kanałach.
Przebieg ciśnienia indykowanego	Dodatkowy program, nie będący kluczowym w pomiarach, dający jednak obraz regularności procesu spalania przy różnych składach mieszanki.

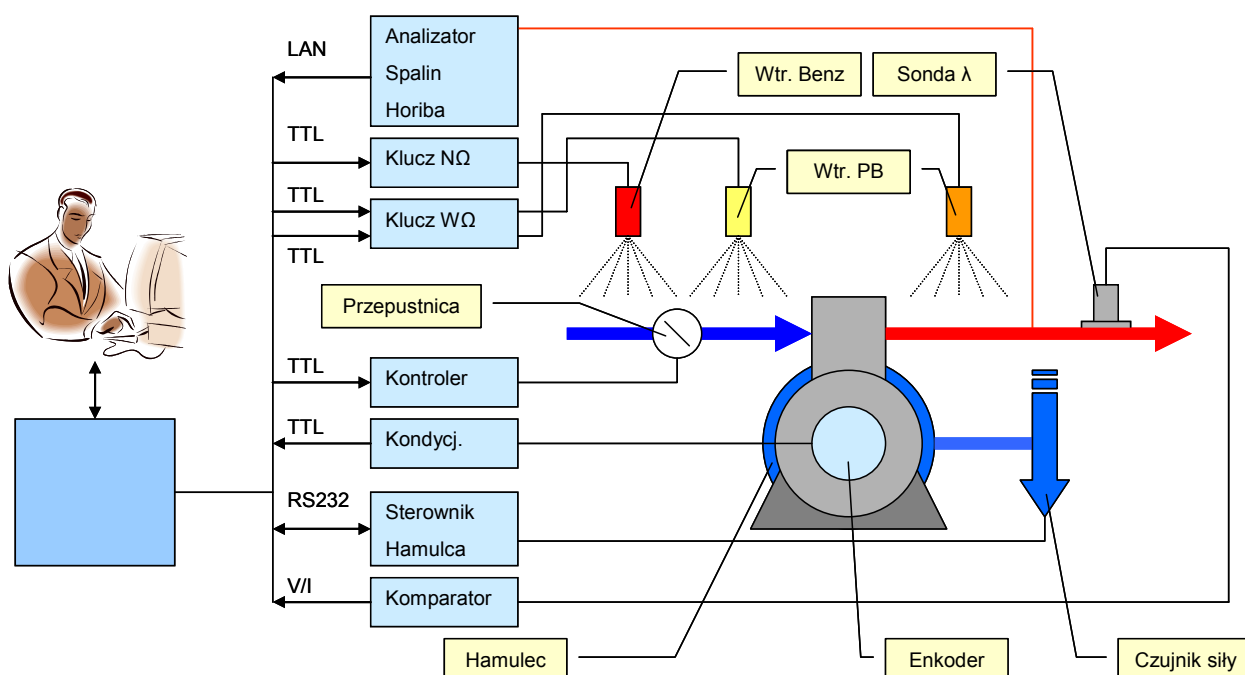
Tab.6.2. Programy obsługujące stanowisko i ich podstawowe funkcje



Rys.6.19. Przykładowe zdjęcia wyglądu interfejsów programów pracujących na stanowisku

6.2.9. Sterownik silnika

Dla łatwej i precyzyjnej regulacji składu mieszanki w szerokich granicach, konieczne było zbudowanie układu umożliwiającego sterowanie wtryskiem oraz przepływem powietrza, który mógł zastąpić fabryczny układ. Na rys. 6.20 przedstawiono elementy wchodzące w skład układu sterowania silnika. Sygnały elektryczne analogowe oraz w standardzie TTL doprowadzone były do kontrolera za pośrednictwem kart pomiarowych. Z pozostałymi urządzeniami kontroler komunikował się za pośrednictwem sieci LAN oraz interfejsu RS232



Rys.6.20. Schemat modułowy układu sterowania silnikiem

Urządzenia odpowiadały za zbieranie, obrabianie i generowanie sygnałów elektrycznych:

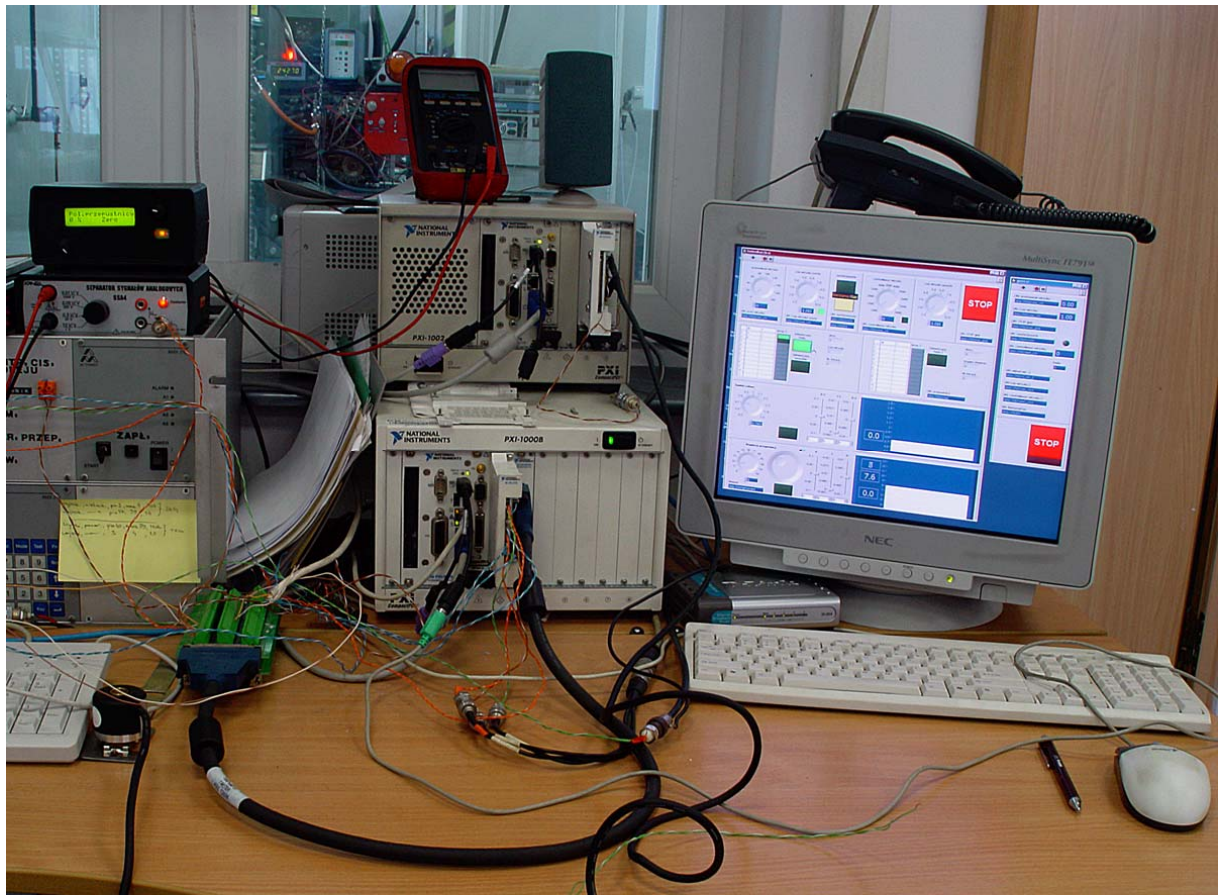
- określających położenie wału korbowego
- sterujących wtryskiwaczami:
 - benzyny
 - propanu-butanu dla wtrysku do kolektora dolotowego
 - propanu-butanu dla wtrysku do kolektora wylotowego
- sterujących położeniem przepustnicy
- pochodzących z proporcjonalnej sondy lambda

Dodatkowymi informacjami wymaganymi w procesie regulacji, udostępnionymi w sieci LAN lub RS232 były:

- współczynnik nadmiaru powietrza λ z analizatora (korygujący)
- moment obrotowy

Hardware sterownika oparty był na systemach akwizycji danych firmy National Instruments. Jako jednostka centralna służył kontroler PXI 1250 RT zainstalowany w przemysłowym standardzie szafy PXI 1000B. Do zbierania i generowania sygnałów elektrycznych posłużyły karty:

- licznik/zegar, PXI 6604
- uniwersalna, PXI 6070



Rys.6.21. Aparatura zastosowana do sterowania pracą silnika, KSS – Komputerowy Sterownik Silnika

Sterownik KSS umożliwiał realizację następujących funkcji:

Funkcja	Charakterystyka	Parametry	Uwagi
Asynchroniczny wtrysk benzyny	Ręczne zadawanie parametrów	T, czas wtrysku f, częstotliwość wtrysku	Niejednocześnie
Asynchroniczny wtrysk gazu			
Synchroniczny wtrysk benzyny	Ręczne zadawanie parametrów	T, czas wtrysku α , kąt wtrysku	Niejednocześnie
Synchroniczny wtrysk gazu			
Asynchroniczny wtrysk gazu przed reaktor	Ręczne zadawanie parametrów	T, czas wtrysku f, częstotliwość wtrysku	Niezależnie od zasadniczego wtrysku
Sekwencyjny wtrysk benzyny	Programowanie cyklicznych sekwencji wtrysku	T _n , czas wtrysku t _n , długość sekwencji	Dotyczy wtrysku synchronicznego i asynchronicznego. Niejednocześnie
Sekwencyjny wtrysk gazu			
Regulacja składu mieszanki	Automatyczna regulacja zadanego składu mieszanki	λ , Skład mieszanki P, I, D, współcz. regulacyjne	Regulator PID, zmiana czasu wtrysku, T
Regulacja obciążenia silnika	Automatyczna regulacja zadanego momentu	M, moment silnika P, I, D, współcz. regulacyjne	Regulator PID, zmiana otwarcia przepustnicy, %
Sekwencje obciążenia silnika	Programowanie cyklicznych ustawień przepustnicy	%n, stopień otwarcia przepustnicy t _n , długość sekwencji	Niezależnie od sterowania wtryskiem

Tab. 6.3. Funkcje sterownika silnika

Dodatkowymi istotnymi modułami wchodzącymi w skład sterownika silnika był układ określający położenie wału korbowego oraz kontroler sterujący otwarciem przepustnicy.

Pomiar położenia wału korbowego odbywał się za pomocą enkodera Kistler, o rozdzielczości 360 znaków na obrót, oraz wskaźnika GMP. Odpowiednio przygotowany sygnał trafiał do karty pomiarowej sterownika.

Sterowanie otwarciem przepustnicy realizowane było za pomocą zbudowanego przez autora kontrolera silnika krokowego (rys. 6.22.)



Rys. 6.22. Kontroler silnika krokowego przepustnicy.

Pozwalał on na kilka możliwości sterowania przepustnicą:

- sterowanie ręczne z określeniem stopnia otwarcia w %,
- sterowanie ręczne przyciskami chwilowymi otwórz/zamknij,
- sterowanie z poziomu programu sterownika silnika (w trybie regulacji PID).

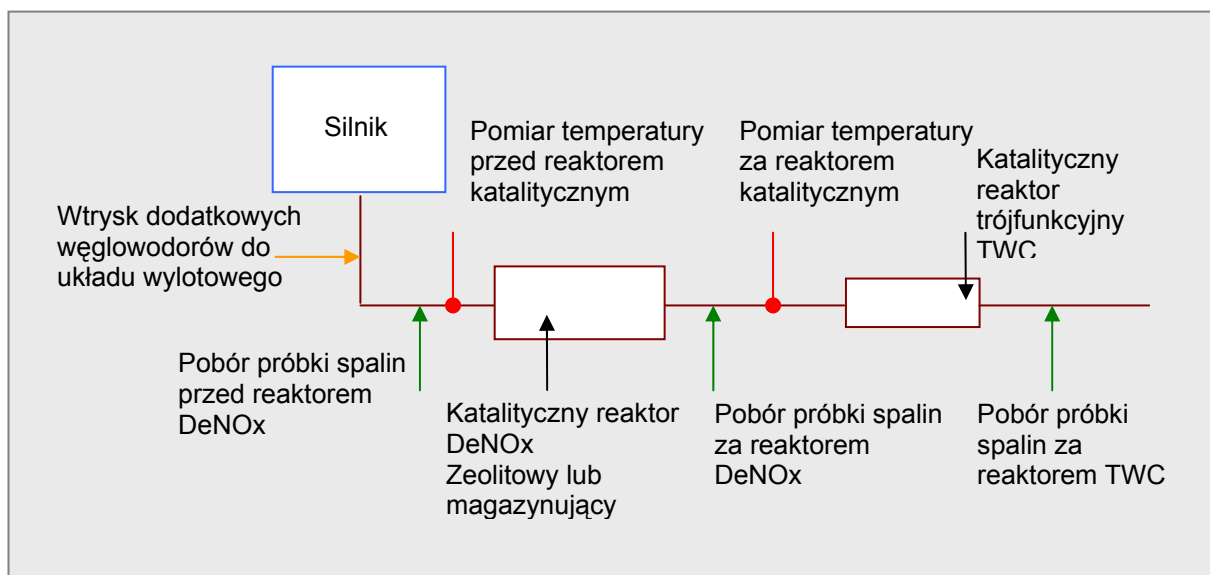
Kontroler umożliwiał też sterowanie prądem uzwojeń w celu zmniejszenia strat mocy na silniku. W trybie pracy z poziomu programu sterownika silnika, regulator otwarcia przepustnicy umożliwiał pracę mikrokrokową silnika krokowego, co zwiększało precyzję regulacji obciążenia silnika.

7. Zastosowanie selektywnej katalitycznej redukcji (SCR) tlenków azotu w układzie wylotowym silnika z wykorzystaniem ciągłego wtrysku węglowodorów przed reaktor katalityczny

Przeprowadzone badania miały na celu określenie możliwości redukcji tlenków azotu w bogatej w tlen atmosferze spalin z wykorzystaniem katalitycznej, selektywnej redukcji (SCR) tlenków azotu. Dostarczenie dodatkowych węglowodorów do strumienia spalin przed katalityczny reaktor zeolitowy lub tlenkowy pozwala na redukcję tlenków azotu w środowisku utleniającym (rozdz. 3.5.). W roli reaktora katalitycznego zastosowano w trakcie badań reaktor zeolitowy oraz dla porównania reaktor magazynujący DeNO_x koncernu PSA.

Stanowisko badawcze i przygotowanie silnika opisano szerzej w rozdziale 6.2.

Silnik zasilany był mieszanką paliwowo-powietrzną o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.1$. Jako paliwa użyto benzyny oraz propanu – butanu. Źródłem węglowodorów był propan-butan doprowadzany do układu wylotowego przed reaktor za pomocą dodatkowych wtryskiwaczy. W trakcie badań przeprowadzono pomiary stężenia składników spalin przed i za reaktorem katalitycznym. Próbkę spalin sprzed reaktora pobierana była za układem wtryskującym dodatkowe węglowodory (rys.7.1).



Rys. 7.1. Konfiguracja układu wylotowego silnika podczas badań z wtryskiem ciągłego strumienia węglowodorów przed reaktor katalityczny.

Podczas pomiaru stężenia węglowodorów również te, pochodzące z dodatkowego źródła sumowały się do całkowitego wyniku. Przy ustalonej prędkości obrotowej 2500 obr/min i współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.1$, zmieniano wydatek masowy wtryskiwanych węglowodorów. Dawkę ustalono na 25, 75, 150 i 200 (225) g/h.

Rys. 7.2. – 7.9. przedstawiają zdolności konwersyjne reaktorów przy różnych strumieniach węglowodorów. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów stężeń toksycznych składników spalin mierzonych przed i za reaktorem oraz procentowej różnicy tych stężeń.

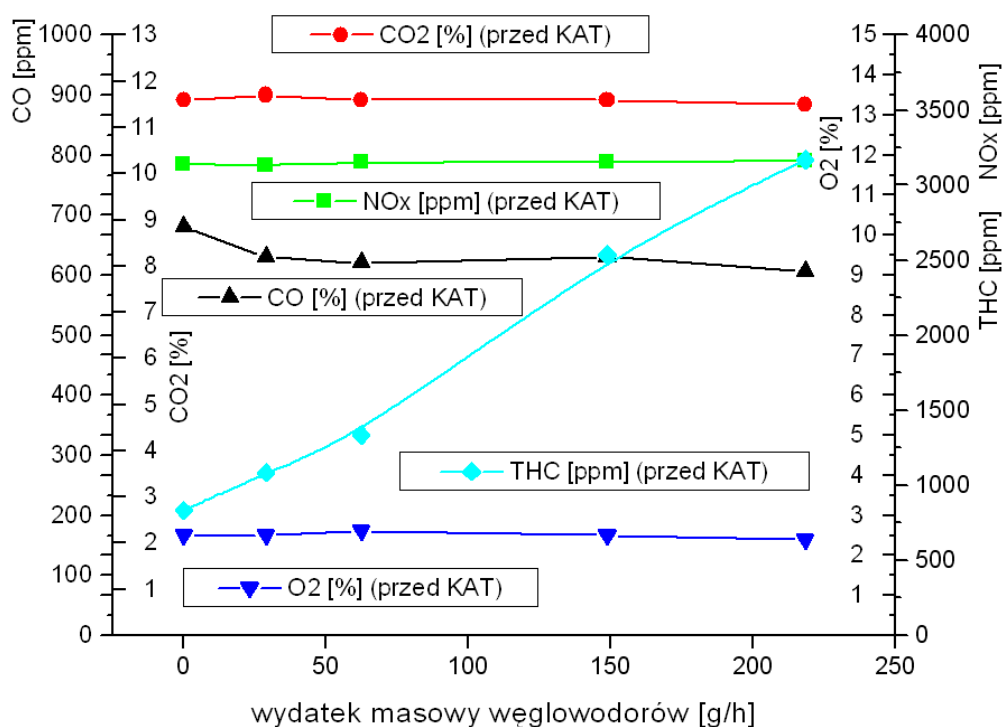
7.1. Badania z zastosowaniem reaktora zeolitowego DeNOx

W trakcie badań nie zaobserwowano istotnej zmiany stężenia tlenków azotu przed reaktorem, w miarę zwiększania natężenia przepływu węglowodorów. Wynika to z braku redukcji termicznej tlenków azotu (SNR) (rys.7.2, rys. 7.3.). Przyczyną tego stanu rzeczy może być zbyt niska temperatura spalin w miejscu doprowadzania węglowodorów do układu wylotowego 940 - 1000 °K. Niewielki wzrost wartości stężenia tlenu węgla, w miarę zwiększania wartości natężenia przepływu węglowodorów, wskazuje na niewielką aktywność wstępnego utleniania propanu-butanu w przewodach wylotowych. Rośnie, z oczywistych względów, wartość stężenia węglowodorów.

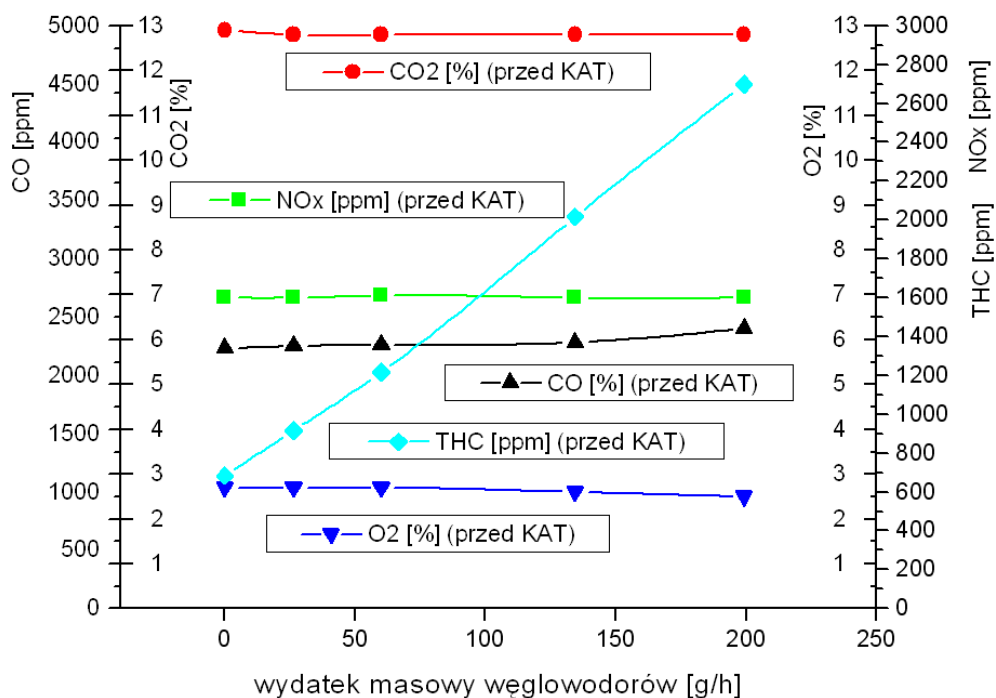
Za reaktorem zeolitym zmniejsza się, wraz ze zwiększaniem stężenia węglowodorów, wartość stężenia tlenków azotu (rys. 7.4, rys.7.5). Sprawność redukcji tlenków azotu osiąga około 11 % dla zasilania benzyną i nie przekracza 10 % przy zasilaniu propanem - butanem, dla maksymalnych stosowanych wartości natężenia przepływu węglowodorów. Przy wykorzystaniu jedynie węglowodorów pochodzących z przestrzeni roboczej silnika sprawność konwersji tlenków azotu kształtuje się w przedziale 3-7 %.

Stopień wykorzystania węglowodorów, oceniany przez sprawność ich konwersji, jest niski, bo wynosi 10-30 %. Wzrost stężenia węglowodorów za reaktorem katalitycznym wskazuje na słabe wykorzystanie czynnika redukującego. Reaktor zeolitywy wykazał niską sprawność konwersji tlenu węgla, a nawet w pewnych stanach generuje ten związek.

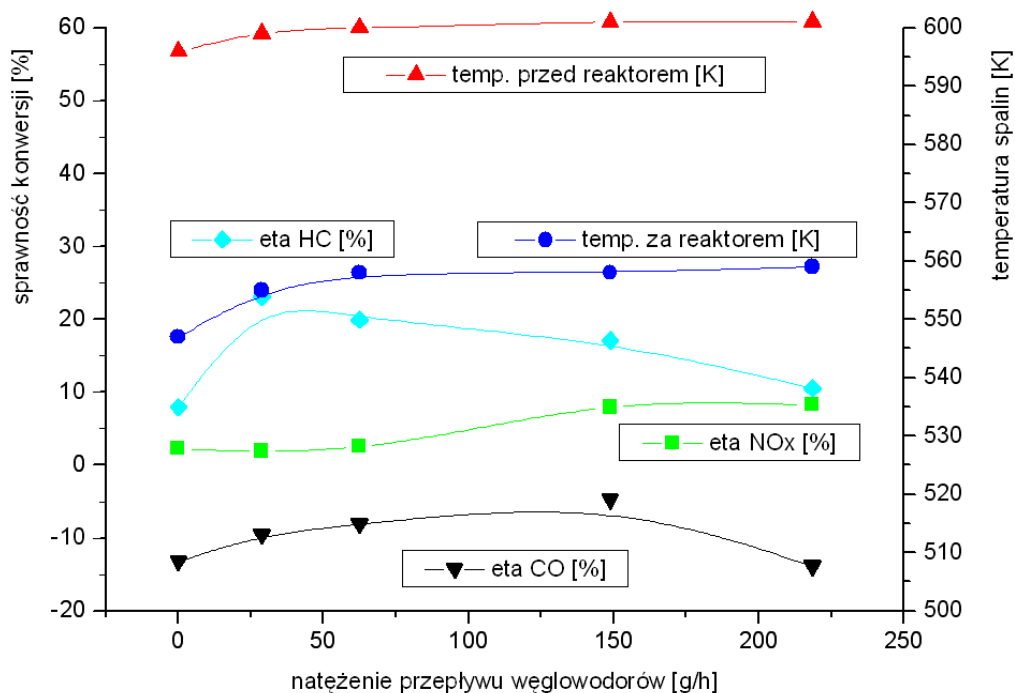
Zastosowanie katalitycznego reaktora trójfunkcyjnego w roli reaktora utleniającego za reaktorem zeolitywym (rys.7.6, rys.7.7), pozwoliło praktycznie wyeliminować tlenek węgla. Skuteczność utleniania węglowodorów nie przekraczała jednak 60%. Potwierdza to tezę o trudnościach z utlenieniem węglowodorów pochodzących z niecałkowitego lub niepełnego spalania propanu-butanu.



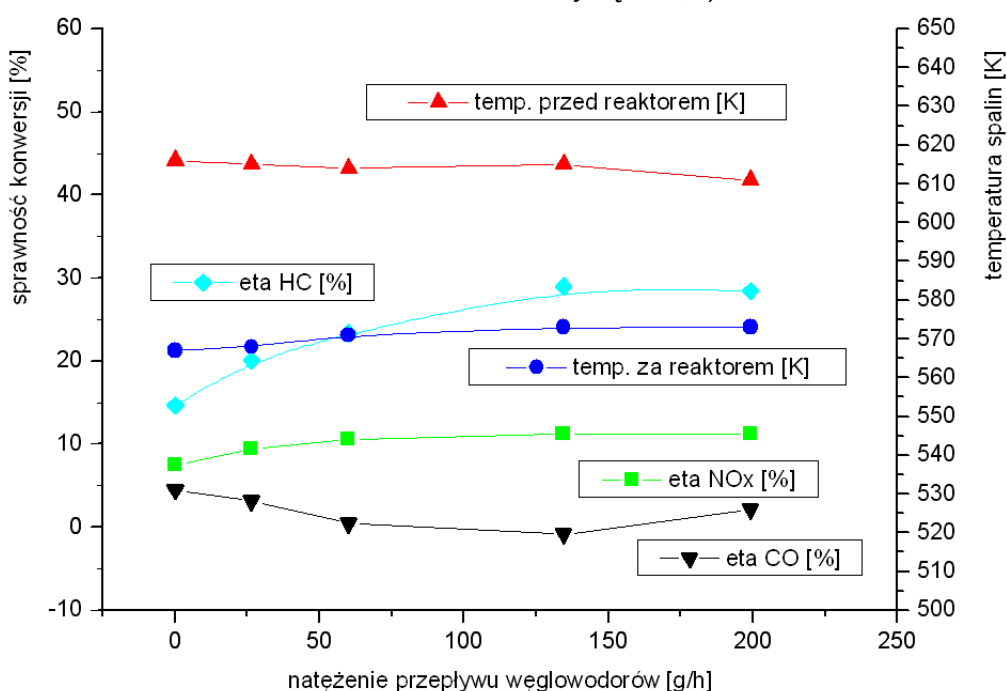
Rys.7.2. Stężenie składników spalin przed reaktorem a za układem wtryskowym dodatkowych węglowodorów w funkcji wydatku masowego węglowodorów, ($n = 2500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie benzyną, $\lambda=1,1$)



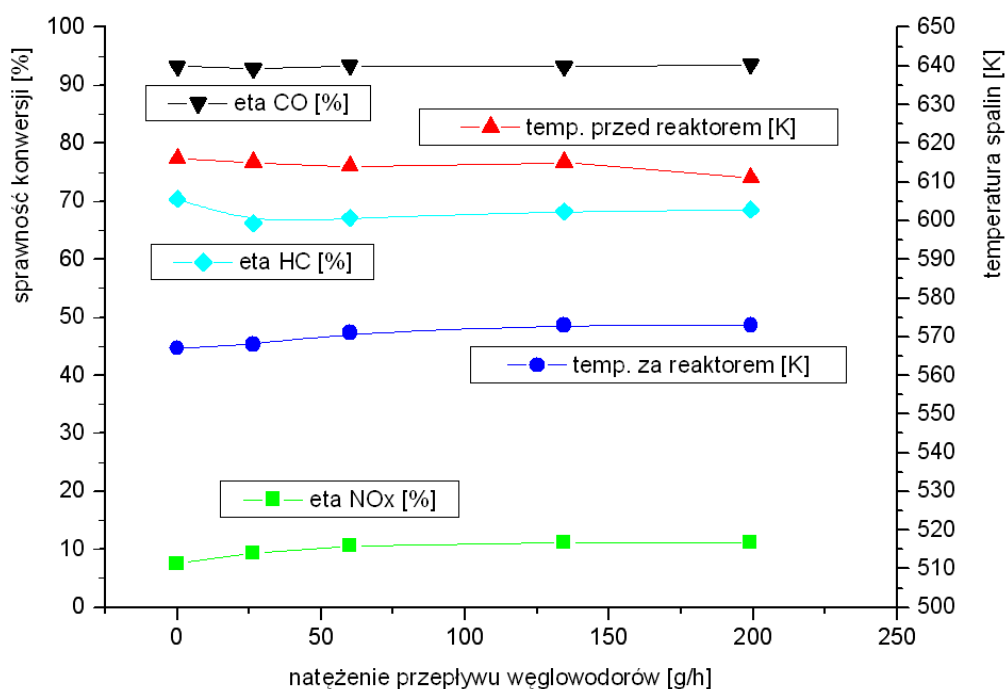
Rys.7.3. Stężenie składników spalin przed reaktorem a za układem wtryskowym dodatkowych węglowodorów w funkcji wydatku masowego węglowodorów, ($n = 2500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie propanem-butanem, $\lambda=1,1$)



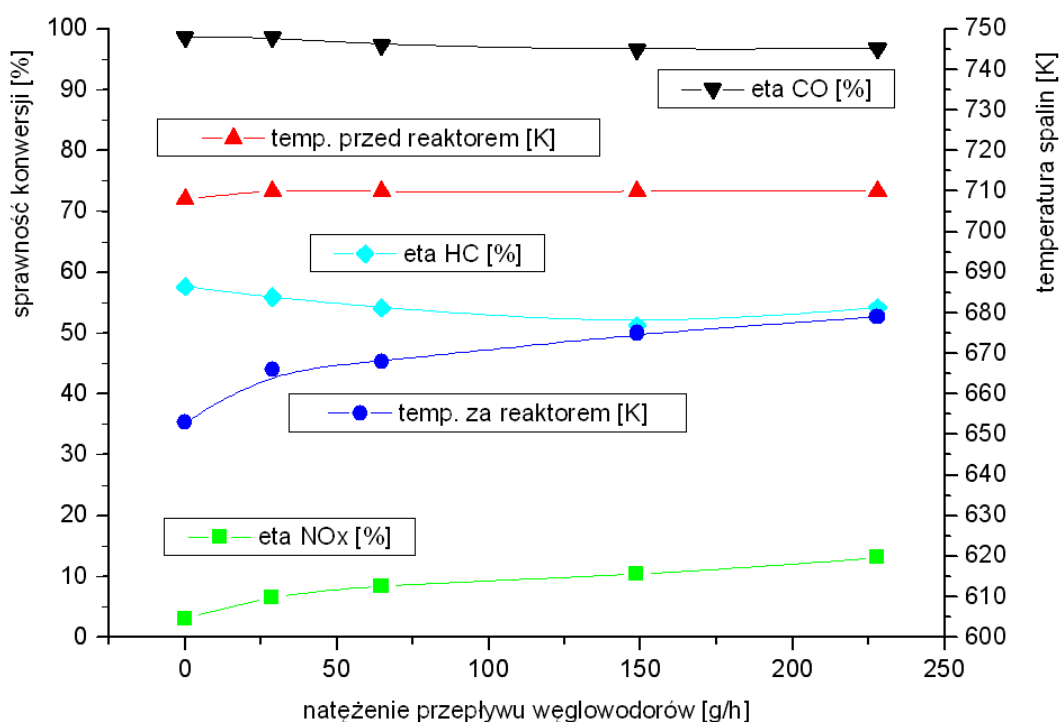
Rys.7.4. Sprawność konwersji tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla w reaktorze zeolitowym, oraz temperatura spalin przed i za reaktorem w funkcji wydatku masowego węglowodorów, ($n = 2500 \text{ obr/min}$, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie benzyną, $\lambda=1,1$)



Rys.7.5. Sprawność konwersji tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla w reaktorze zeolitowym, oraz temperatura spalin przed i za reaktorem w funkcji wydatku masowego węglowodorów, ($n = 2500 \text{ obr/min}$, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie propanem-butanem, $\lambda=1,1$)



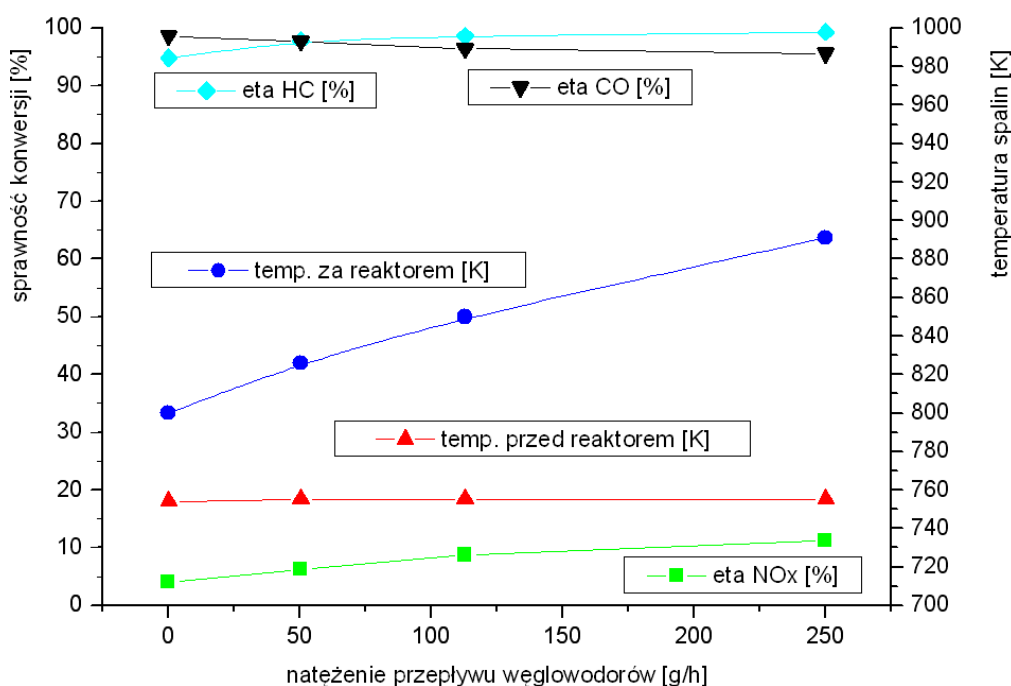
Rys.7.6. Sprawność konwersji tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla w reaktorze zeolitowym współpracującym z reaktorem utleniającym, oraz temperatura spalin przed i za reaktorem, w funkcji wydatku węglowodorów, ($n = 2500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie benzyną, $\lambda=1,1$)



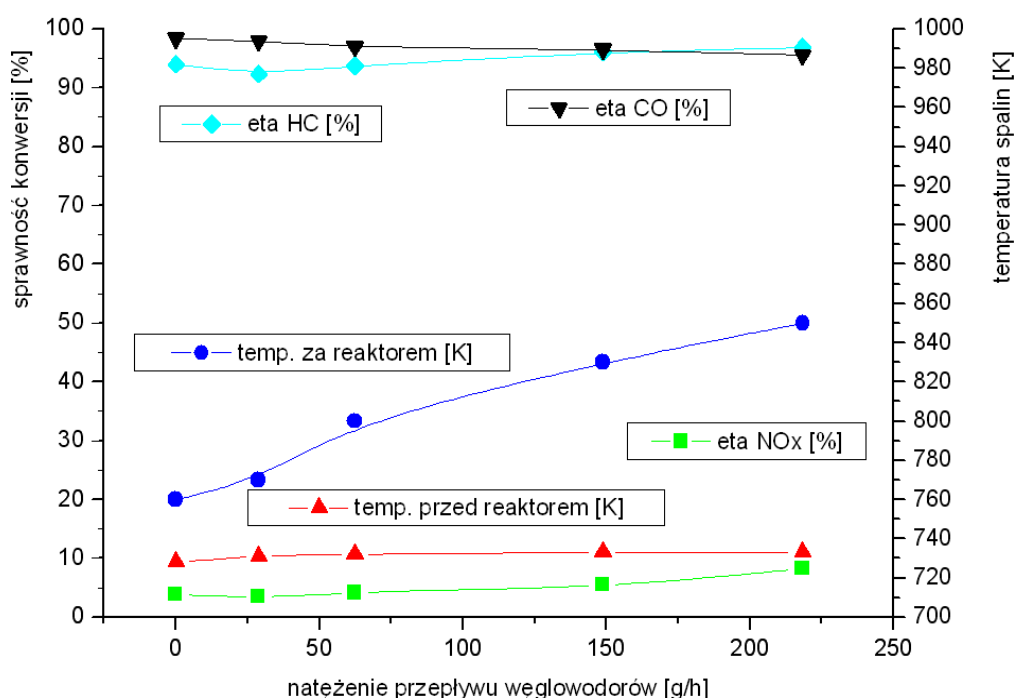
Rys.7.7. Sprawność konwersji tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla w reaktorze zeolitowym współpracującym z reaktorem utleniającym, oraz temperatura spalin przed i za reaktorem w funkcji wydatku węglowodorów, ($n = 2500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie propanem-butanem $\lambda=1,1$)

7.2. Badania z zastosowaniem reaktora magazynującego DeNO_x

Reaktor magazynujący posiada zdolność przechowywania tlenków azotu w środowisku bogatym w tlen oraz ich redukcji w momencie doprowadzenia węglowodorów. Badania przeprowadzono w analogicznych warunkach pracy jak dla katalizatora zeolitowego. Sprawność konwersji reaktora magazynującego przedstawiono na rys. 7.8 i rys.7.9.



Rys.7.8. Sprawność konwersji tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla w reaktorze magazynującym, oraz temperatura spalin przed i za reaktorem, w funkcji wydatku węglowodorów, ($n = 2500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie benzyną, $\lambda=1,1$)



Rys.7.9. Sprawność konwersji tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla w reaktorze magazynującym, oraz temperatura spalin przed i za reaktorem, w funkcji wydatku węglowodorów, ($n = 2500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie propanem-butanem, $\lambda=1,1$)

W przypadku reaktora magazynującego, wyposażonego również w segment reaktora trójdrożnego zaobserwowano niewielki wzrost wartości stężenia tlenku węgla za reaktorem w miarę zwiększania wartości natężenia przepływu węglowodorów. Również zaobserwowano za reaktorem wzrost wartości stężenia węglowodorów. Za reaktorem, zmniejsza się wraz ze zwiększaniem stężenia węglowodorów, wartość stężenia tlenków azotu. Sprawność redukcji tlenków azotu jest niewielka, osiąga około 9 % dla benzyny i propanu-butanu, dla maksymalnych stosowanych wartości natężenia przepływu węglowodorów. Przy wykorzystaniu jedynie węglowodorów pochodzących z przestrzeni roboczej silnika sprawność konwersji tlenków azotu kształtuje się w przedziale 4-8 %. Wskazuje to na słabą reaktywność propanu-butanu z tlenkami azotu w warunkach wtrysku ciągłego strumienia węglowodorów przed reaktor. Wraz ze wzrostem strumienia węglowodorów sprawność konwersji tlenków azotu rośnie w niewielkim stopniu. Wysoką sprawnością charakteryzuje się segment utleniający reaktora. Sprawność przetwarzania tlenku węgla i węglowodorów przekracza 95%. W tej sytuacji nie jest konieczne stosowanie dodatkowego reaktora utleniającego.

8. Badania sprawności układu oczyszczania spalin z toksycznych związków przy zasilaniu silnika propanem-butanem przy zmiennej wartości współczynnika nadmiaru powietrza i zastosowaniu katalitycznego reaktora magazynującego DeNOx

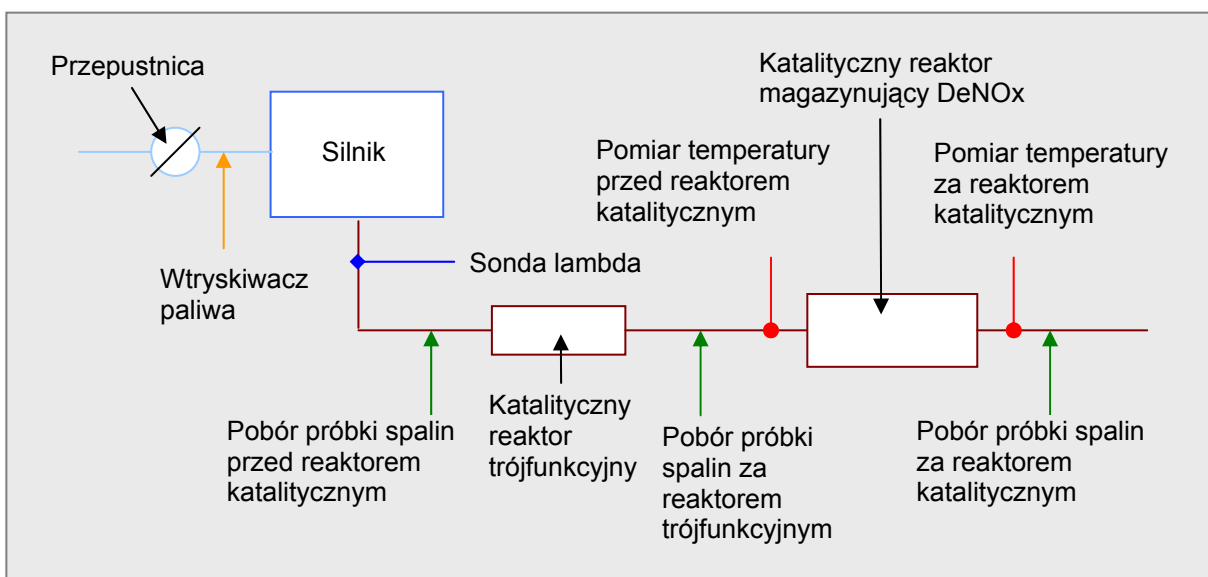
Ostatnia, trzecia faza badań dotyczyła pomiarów mających na celu wykazanie możliwości stosowania ubogiej mieszanki propanu-butanu. Do badań użyto katalitycznego reaktora magazynującego DeNOx pochodzącego od silnika VW 1.4 FSI.

Celem badań było określenie możliwości stosowania w silniku ZI składu mieszanki o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda > 1$. W silniku ZI, przy ustalonym obciążeniu i spalaniu mieszanki homogenicznej, można znaleźć taki jej skład, przy którym sprawność efektywna jest największa. Z reguły najwyższa sprawność występuje przy nieco zubożonej mieszance (λ ok. 1,15), przy czym, jak zostało to pokazane w rozdziale 4, ta granica przesuwą się w stronę wyższych wartości λ dla zasilania propanem-butanem (λ ok. 1,2). Jednak wartości te mogą się różnić w zależności od aktualnego obciążenia i prędkości obrotowej silnika. W fazie aplikacji należałoby stworzyć mapę najwyższej sprawności dla całego pola pracy silnika.

Przy określonej prędkości obrotowej silnika i określonym składzie mieszanki wymagany moment obrotowy uzyskać można przez odpowiedni dobór stopnia otwarcia przepustnicy oraz czasu wtrysku paliwa. W tym przypadku regulacja mocy silnika jest funkcją dwóch parametrów, dławienia dopływu mieszanki paliwowo-powietrznej do cylindrów oraz jej składu. Taki system regulacji nazywamy ilościowo-jakościowym. W przypadku silników ZI wyposażonych w reaktor trójfunkcyjny regulacja mocy jest jednoparametrowa i realizowana jest jedynie przez zmianę otwarcia przepustnicy (regulacja ilościowa).

Zastosowanie reaktora magazynującego, który umożliwia oczyszczenie spalin z tlenków azotu silnika pracującego na ubogiej mieszance wymaga odpowiedniego sterowania układem zasilania silnika. Reaktor magazynujący pracuje w cyklach magazynowania tlenków azotu i oczyszczania powierzchni magazynującej, co wymaga zmiany składu mieszanki. Dlatego sterownik silnika musi odpowiednio sterować otwarciem przepustnicy oraz dawką paliwa (regulacja ilościowo-jakościowa). Szerzej o układach potrzebnych do realizacji takiego zadania zostało napisane w rozdziale 6. Na rys. 8.1. przedstawiono konfigurację silnika w omawianej serii badań. W układzie dolotowym silnika zainstalowano przepustnicę napędzaną silnikiem krokowym, wtryskiwacz propanu-butanu oraz w układzie wylotowym proporcjonalną sondę lambda. Elementy te wchodziły w skład układu zasilania

przygotowującego mieszankę. W układzie wylotowym znajdował się katalityczny reaktor trójdrożny oraz za nim katalityczny reaktor magazynujący DeNOx.



Rys. 8.1. Konfiguracja układu dolotowego i wylotowego silnika podczas badań z zastosowaniem reaktora magazynującego DeNOx

Przed pomiarami ustalono wartość kąta wyprzedzenia zapłonu odpowiadającą maksymalnemu momentowi w danych warunkach pracy silnika. Próbkę do pomiaru stężenia toksycznych składników spalin pobierano przed i za katalitycznym reaktorem trójdrożnym oraz za katalitycznym reaktorem magazynującym DeNOx. Mierzona była również temperatura mediów w istotniejszych strefach silnika. Ciśnienie paliwa w układzie zasilania silnika utrzymywane było na poziomie 8 barów. Temperatura paliwa była stała w trakcie pomiaru. Utrzymywanie stałej wartości ciśnienia i temperatury paliwa, kontrola temperatury powietrza doprowadzanego do silnika oraz utrzymywanie zbliżonych warunków temperatury i wilgotności w pomieszczeniu hamowni dawały dużą powtarzalność wyników. Było to istotne ze względu na późniejsze wykorzystanie zestawu parametrów do odtworzenia warunków pracy przy określaniu zdolności magazynujących reaktora magazynującego DeNOx.

Do badań wybrano pomiary przy następujących parametrach pracy silnika:

- 12 Nm, 2500 obr/min
- 24 Nm, 2500 obr/min
- 24 Nm, 3500 obr/min

Wartości te wybrano ze względu na najczęstsze wykorzystywanie silnika przy niskich i średnich obciążeniach oraz średnich prędkościach odpowiadających warunkom jazdy miejskiej, kiedy silnik odznacza się niską sprawnością.

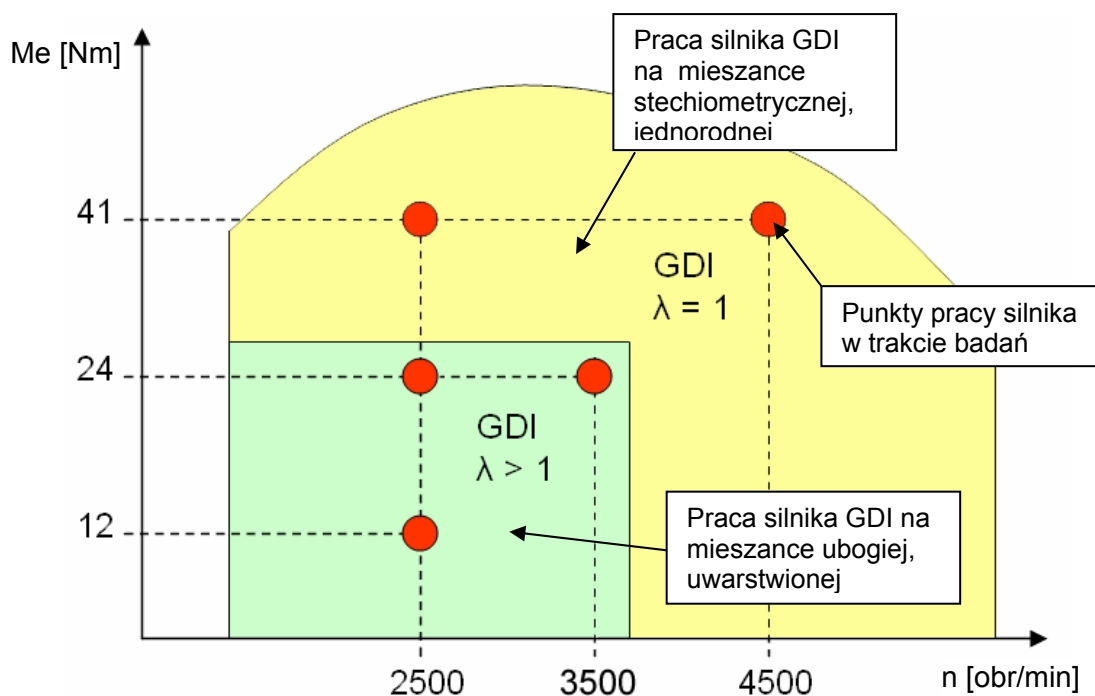
Kolejne punkty wybrano dla następujących parametrów pracy silnika:

- 41 Nm, 2500 obr/min

- 41 Nm, 4500 obr/min

Wartość 41 Nm odpowiadała maksymalnemu momentowi, jaki dało się uzyskać przy prędkości 4500 obr/min. przy zachowaniu warunku najwyższej sprawności silnika.

Ostatnie dwa stany pracy ze względu na duże obciążenie silnika odpowiadały gwałtownym przyspieszeniom albo dużym prędkościom samochodu w warunkach drogowych. W tych warunkach silniki z bezpośrednim wtryskiem paliwa pracują na homogenicznej i stechiometrycznej mieszance. Tracąc możliwość wykorzystania zalet wynikających ze spalania mieszanek ubogich i uwarstwionych, nie stanowią one znaczącej przewagi nad silnikami wyposażonymi w standardowy system wtrysku wielopunktowego. Na rys.8.2. przedstawiono punkty pracy silnika, w których przeprowadzono badania. Zostały one naniesione na charakterystykę silnika, na której zaznaczono pola pracy silnika z wtryskiem bezpośrednim (GDI) mogącego pracować na mieszankach ubogich i uwarstwionych.

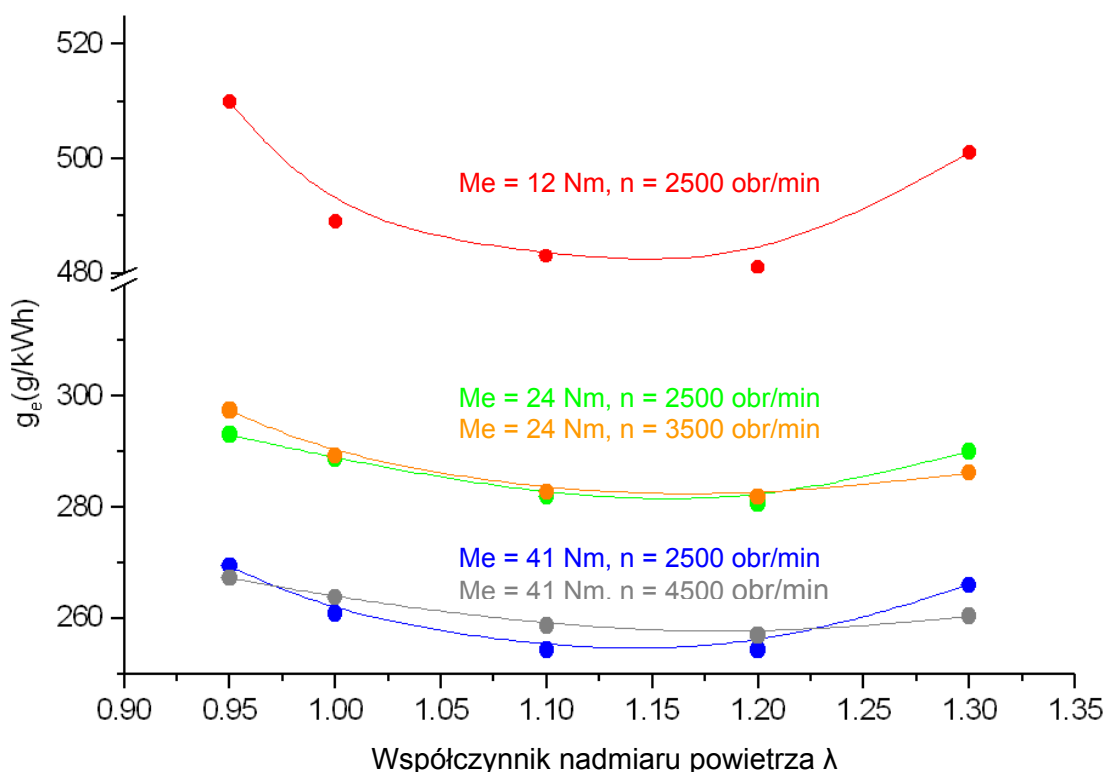


Rys. 8.2. Punkty pomiarowe oraz pola pracy silnika GDI na mieszance ubogiej -uwarstwionej $\lambda > 1$ oraz stechiometrycznej, jednorodnej $\lambda = 1$.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania, na podstawie których wykreślono charakterystyki regulacyjne jednostkowego zużycia paliwa w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ (rys.8.3). Określono również czas wtrysku i stopień otwarcia przepustnicy dla wartości $\lambda = 0.95$ oraz dla wartości λ odpowiadającej największej sprawności silnika. Wartości te posłużyły jako wyjściowe do zaprogramowania sekwencji podczas badań katalitycznego reaktora magazynującego tlenki azotu.

Na rysunku 8.3. przedstawiono charakterystykę regulacyjną jednostkowego zużycia paliwa dla określonych wcześniej warunków pracy silnika, w funkcji λ . Minimum jednostkowego zużycia paliwa występowało przy wartości $\lambda = 1.1 - 1.2$. W stosunku do $\lambda = 1$ zmniejszenie wartości jednostkowego zużycia paliwa wynosiło przy $\lambda = 1.2$ kolejno :

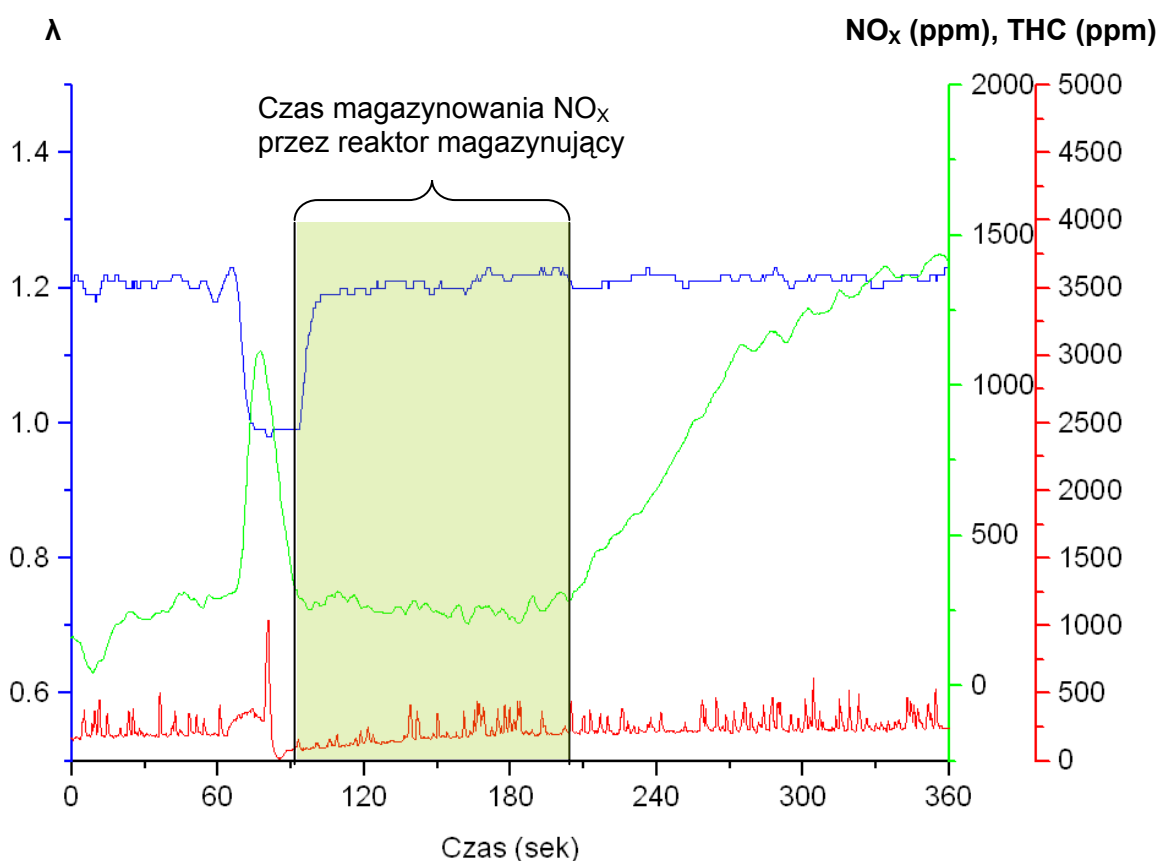
- 1.6 % przy $Me = 12$ Nm i $n = 2500$ obr/min. ($Ne = 3.14$ kW)
- 6.6 % przy $Me = 24$ Nm i $n = 2500$ obr/min. ($Ne = 6.28$ kW)
- 5.4 % przy $Me = 41$ Nm i $n = 2500$ obr/min. ($Ne = 10.7$ kW)
- 5 % przy $Me = 24$ Nm i $n = 3500$ obr/min. ($Ne = 8.8$ kW)
- 5.7 % przy $Me = 41$ Nm i $n = 4500$ obr/min. ($Ne = 19.3$ kW)



Rys.8.3. Charakterystyka regulacyjna jednostkowego zużycia paliwa.

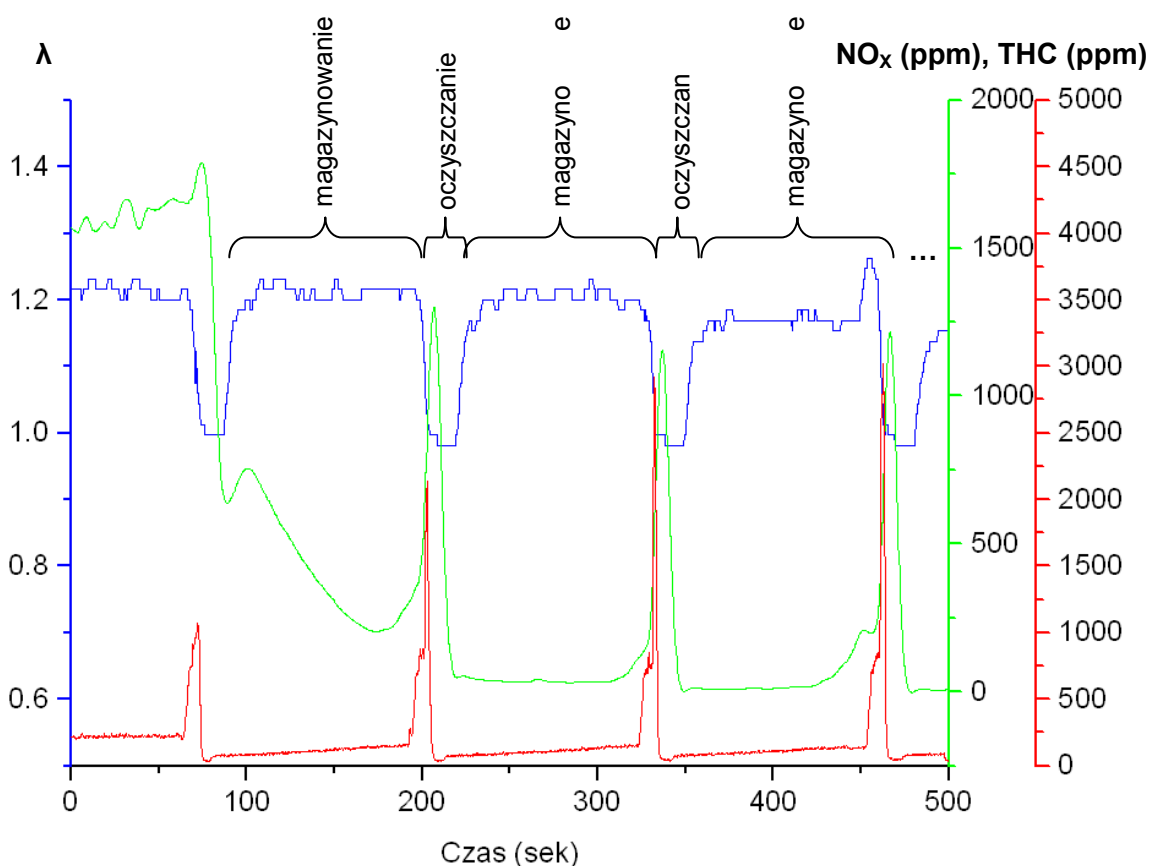
Korzyści stosowania ubogiej mieszanki są widoczne zwłaszcza dla średniego obciążenia. Dla małego obciążenia (12 Nm, 2500 obr/min.) zmniejszenie zużycia wyniosło jedynie ok. 1.6 %.

Po wyznaczeniu charakterystyki jednostkowego zużycia paliwa następnym etapem było zaprogramowanie sekwencji zasilania silnika, przy których możliwa była prawidłowa praca katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x. Dla wszystkich punktów pomiarowych przyjęto współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$ przy pracy silnika na ubogiej mieszance oraz $\lambda = 0.95$ podczas wzbogacania mieszanki w celu oczyszczenia reaktora magazynującego. Na rys. 8.4. przedstawiono stężenie spalin za reaktorem magazynującym DeNO_x zmierzone przez analizator i zarejestrowane w czasie 6 minut. W tym przypadku począwszy od 90 sekundy pomiaru silnik zasilany był mieszanką o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$. W przedziale czasu między 90 a 210 sekundą stężenie tlenków azotu za reaktorem wynosiło ok. 250 ppm. Stężenie NO_x przed reaktorem wynosiło w tym samym okresie 2450 ppm. W tym czasie (ok. 2 min) reaktor magazynował tlenki azotu.



Rys.8.4. Wzrost stężenia tlenków azotu wynikający z przekroczenia zdolności magazynujących reaktora DeNO_x. $\lambda = 1.2$, 41Nm / 2500obr/min.

Podczas gdy następowało zwiększenie stężenia tlenków azotu za reaktorem należało wzbogacić mieszankę do wartości współczynnika $\lambda = 0.95 - 0.98$. Przy wzbogaconej mieszance, w spalinach tlen oraz tlenki azotu występują w niewielkich stężeniach. Pojawia się natomiast znaczna ilość tlenku węgla i niespalonych węglowodorów wykorzystywanych w procesie redukcji. Takie chwilowe wzbogacenie powodowało oczyszczenie struktury przechwytyjącej reaktora i przygotowanie go do kolejnego cyklu. Na rys. 8.5. przedstawiono proces stopniowego oczyszczania reaktora przy cyklicznej pracy silnika.



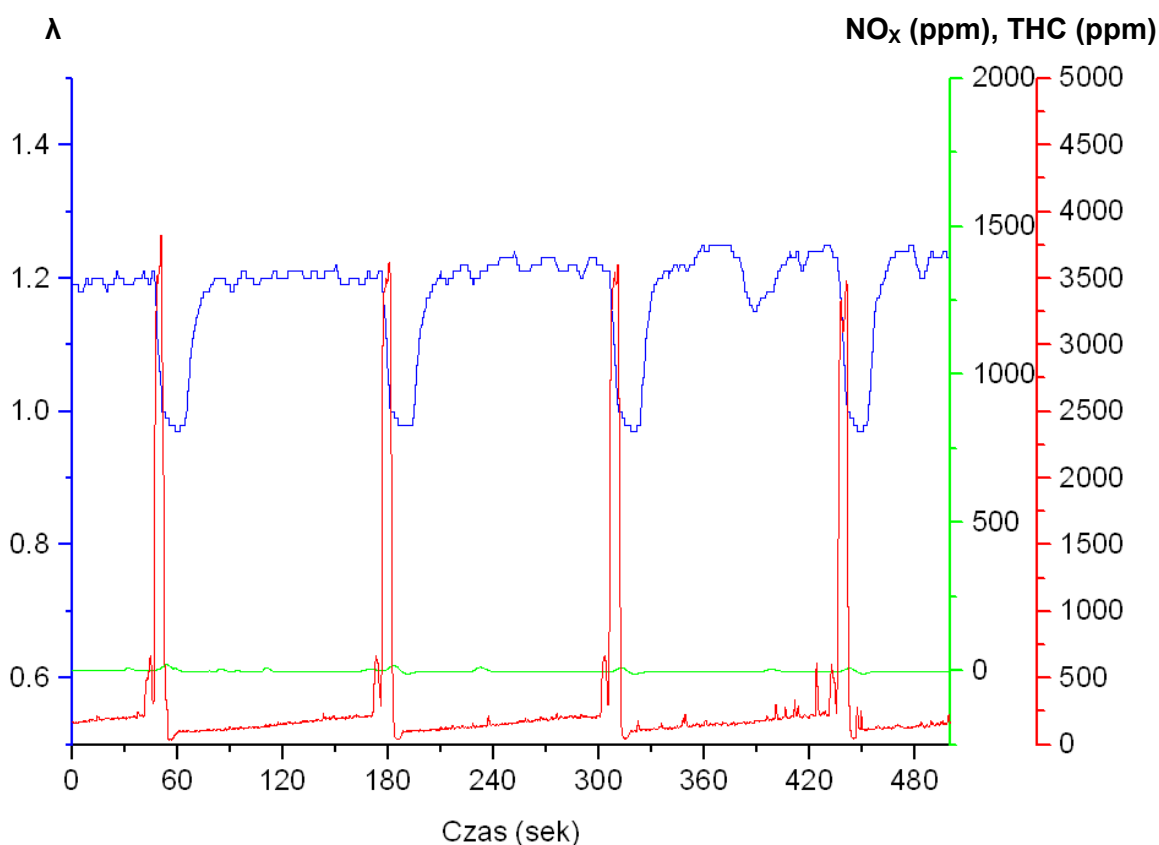
Rys.8.5. Zdolność oczyszczania spalin z tlenków azotu przy sterowaniu cyklicznym składu mieszanki 120 – 10 sek. ($M_e = 24Nm$, $n = 2500$ obr/min.)

Czas, w którym reaktor magazynuje tlenki azotu zależy od kilku czynników. Po pierwsze od wielkości strumienia tlenków azotu dostającego się do reaktora, co zależy od stężenia i strumienia spalin przy danym obciążeniu i prędkości obrotowej silnika. Drugim czynnikiem był stopień oczyszczenia reaktora w fazie pracy na bogatej mieszance.

Proporcje cykli magazynowanie-oczyszczanie, należało przyjąć odpowiednio z kilku cykli uśrednionej wartości stężenia tlenków azotu za reaktorem i uśrednionej wartości

jednostkowego zużycia paliwa. Tak samo postępowano dla obliczenia sprawności układu biorąc wyniki z kilku cykli.

Na rys. 8.6 przedstawiono na podstawie przeprowadzonych badań, możliwości redukcji NO_x przez reaktor przy cyklach 120 sekund pracy na ubogiej mieszance ($\lambda = 1.2$) oraz 10 sekund pracy na mieszance wzbogaconej ($\lambda = 0.95$). Cykl pracy silnika o takich proporcjach nie dawał korzyści w zmniejszeniu zużycia paliwa, jednak katalityczny reaktor magazynujący działał z bardzo wysoką sprawnością.



Rys. 8.6. Zdolność oczyszczania spalin z tlenków azotu przy sterowaniu cyklicznym składu mieszanki 120 – 10 sek. ($M_e = 24\text{Nm}$, $n = 2500\text{ obr/min}$) po wielu cyklach.

W sytuacji, gdy nie ma potrzeby redukcji tlenków azotu do niemal zerowego poziomu, a bardziej liczy się oszczędność paliwa, należy skracać okres oczyszczania do momentu kiedy poziom tlenków azotu za reaktorem osiągnie wartość uzyskiwaną przy pracy silnika z reaktorem trójfunkcyjnym i składzie mieszanki $\lambda = 1$. W trakcie badań ustalono trzy, stałe cykle różniące się długością trybu pracy na mieszance bogatej. Każdy z nich miał inny wpływ na średnią wartość stężenia tlenków azotu za reaktorem i na całkowite zużycie paliwa przez silnik. Różnica jednostkowego zużycia paliwa pomiędzy zasilaniem mieszanką o

współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$ a $\lambda = 0.95$ wynosiła we wszystkich punktach pomiarowych w przybliżeniu 9-10 %. W związku z tym, średnie zużycie paliwa przy pracy cyklicznej zwiększało się w stosunku do pracy przy stałym współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$ odpowiednio o:

- ok. 1.4 %, przy cyklu, w którym czas magazynowania wynosił 120 sekund przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$, a czas oczyszczania 20 sekund przy $\lambda = 0.95$ (cykl 120s/20s),
- ok. 0.8 %, przy cyklu 120 sekund oraz $\lambda = 1.2$, w stosunku do 10 sekund oraz $\lambda = 0.95$ (cykl 120s/10s),
- ok. 0.5 %, przy cyklu 120 sekund oraz $\lambda = 1.2$, w stosunku do 5 sekund oraz $\lambda = 0.95$ (cykl 120s/5s).

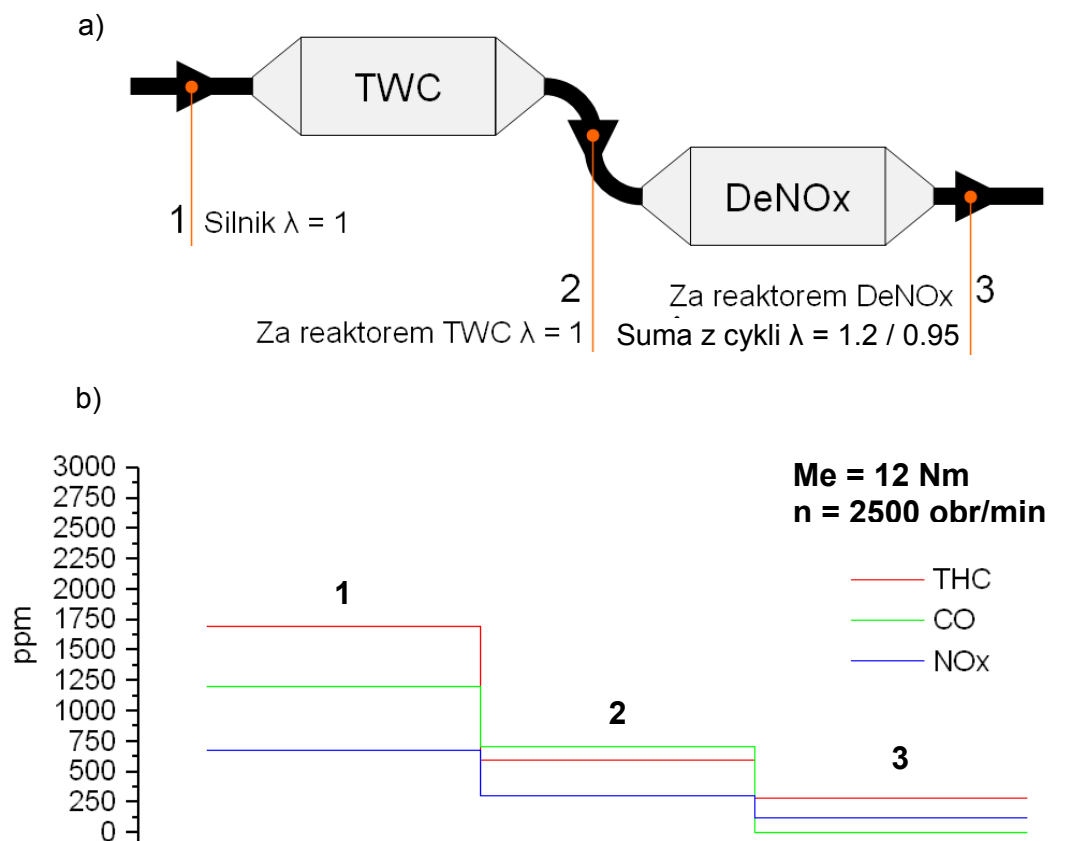
W trakcie badań stosowano również inne czasy cykli np. 60 sekund w stosunku do 10 sekund (cykl 60s/10s) lub 30 sekund do 5 sekund (cykl 30s/5s), jednak nie zauważono wyraźnej różnicy w sprawności reaktora, nie wpływało to na średnią wartość zużycia paliwa a uwzględniać należało wtedy samą reakcję analizatora spalin na tak krótkie cykle.

Na rys. 8.7 – 8.11 oraz tab. 8.1. przedstawiono stężenie CO, THC, oraz NO_x w spalinach w kolektorze wylotowym przed reaktorem i za reaktorem trójfunkcyjnym oraz za reaktorem magazynującym DeNO_x, co oznaczono kolejnymi numerami na rysunku 8.7.

Punkt poboru spalin oznaczony numerem „1” znajdował się przed katalitycznym reaktorem trójfunkcyjnym. W czasie pomiarów silnik zasilany był mieszanką stechiometryczną.

W tych samych warunkach jakie istniały podczas pomiaru stężeń toksycznych składników spalin przed reaktorem, pobierane były próbki za reaktorem TWC w punkcie poboru „2”. Na podstawie wyników pomiarów stężeń składników spalin zmierzonych z próbek „1” oraz „2” można było określić sprawność reaktora przy zasilaniu silnika propanem-butanem podczas pracy silnika na fabrycznym sterowniku.

Próbki pobierane za katalitycznym reaktorem magazynującym oznaczone zostały na wykresach jako „3”. Pomiar odbywał się w innych warunkach niż wtedy gdy pobierano próbki „1” oraz „2”. Stężenie CO, THC oraz NO_x za katalitycznym reaktorem magazynującym stanowiło średnią wartość stężenia mierzonego w cyklach magazynowania i oczyszczania reaktora. Silnik zasilany był mieszanką paliwowo-powietrzną o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$ oraz $\lambda = 0.95$ w cyklach uznanych za optymalne pod względem średniego stężenia tlenków azotu oraz średniego zużycia paliwa.



Rys.8.7. Wykres stężenia THC, CO, NO_x w trzech miejscach układu wylotowego

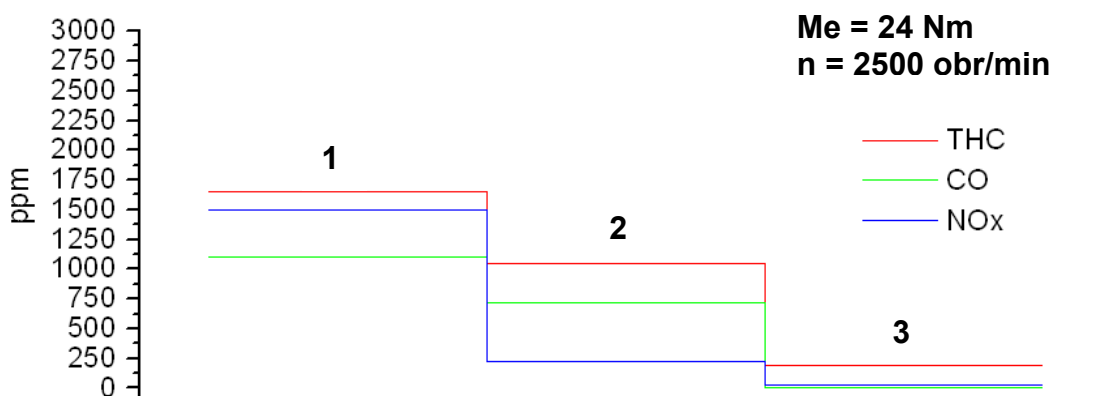
a) – schemat przedstawiający miejsca poboru próbek:

1 – przed reaktorem TWC, 2 – za reaktorem TWC,

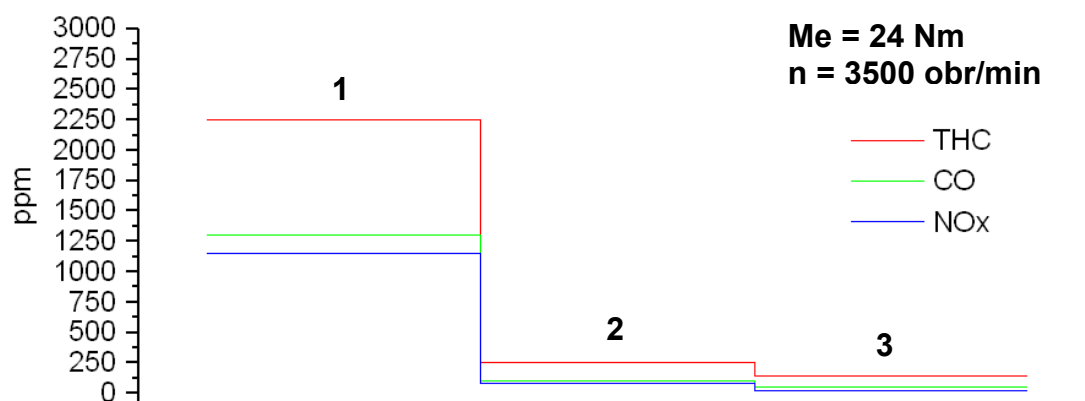
3 – za reaktorem magazynującym DeNO_x.

b) – Stężenie THC, CO, NO_x w trzech punktach pomiarowych,

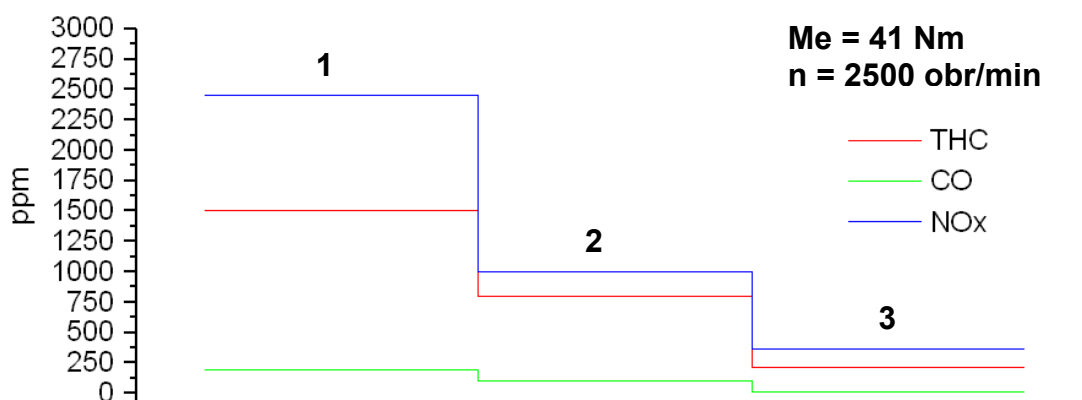
cykl magazynowanie 120s / cykl oczyszczania 5s (120s/5s).



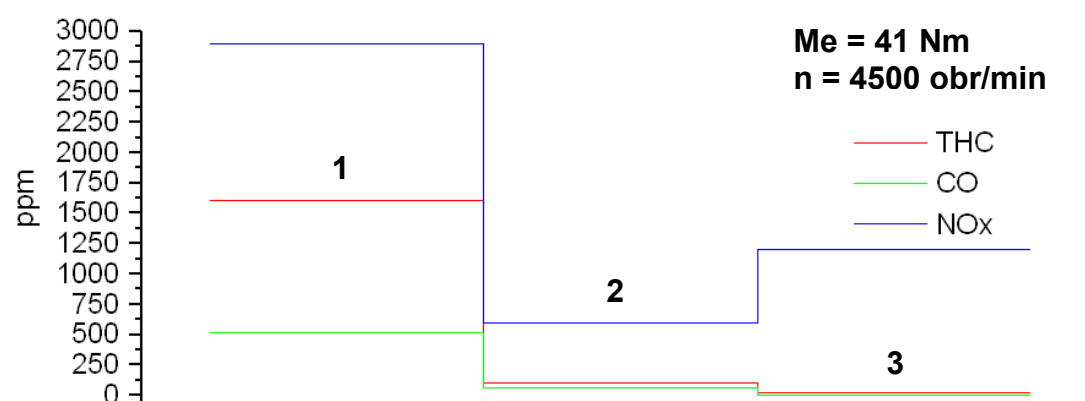
Rys.8.8. Stężenie THC, CO, NO_x w trzech punktach pomiarowych, cykl 120s/5s.



8.9. Stężenie THC, CO, NO_x w trzech punktach pomiarowych, cykl 120s/20s.



Rys. 8.10. Stężenie THC, CO, NO_x w trzech punktach pomiarowych, cykl 120s/10s (60s/5s).



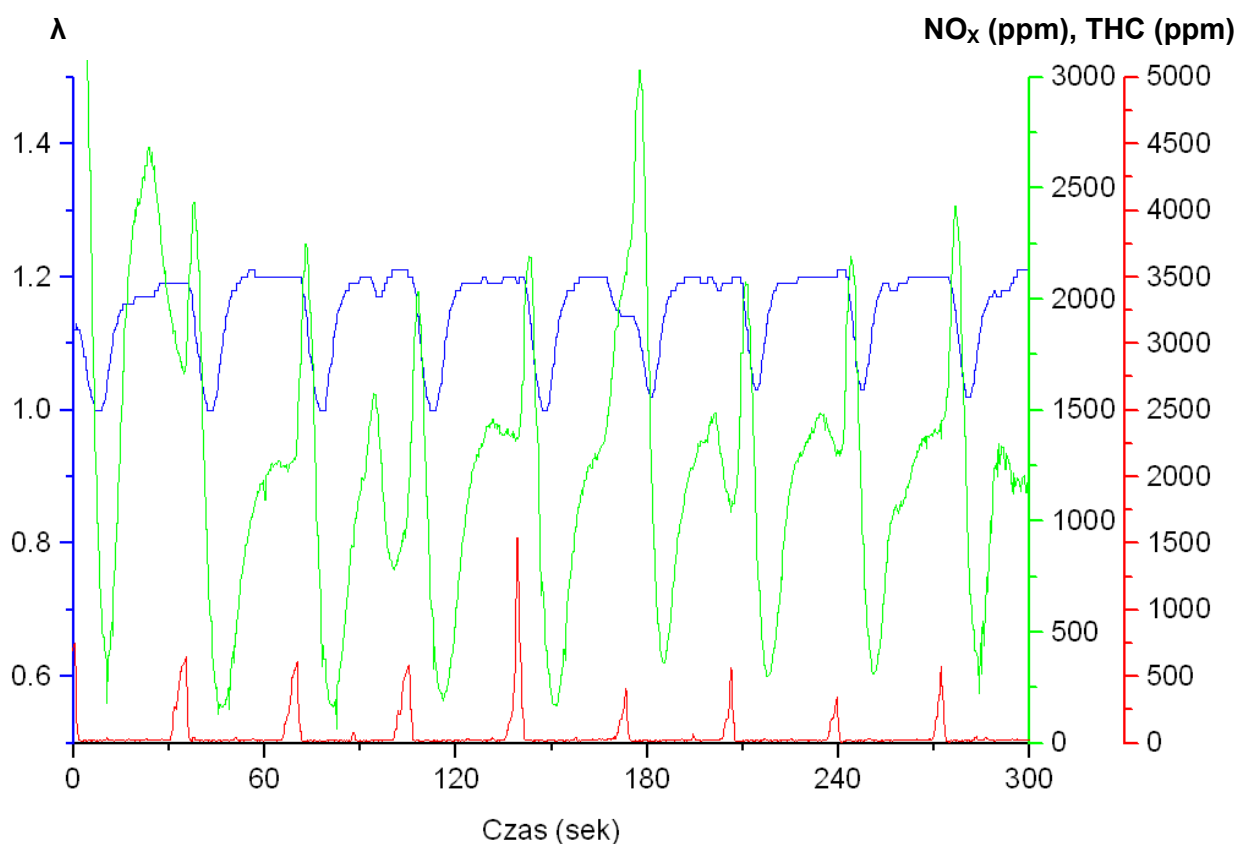
Rys. 8.11. Stężenie THC, CO, NO_x w trzech punktach pomiarowych, cykl 120s/20s (30s/5s).

Me = 12Nm, n = 2500 obr/min, Ne = 3.14 kW, cykl 120 s magazynowanie/5 s oczyszczanie			
Skład (ppm)	1. Przed reaktorem	2. Za TWC	3. Za DeNO _x
CO	1200	710	0
THC	1700	690	280
NO _x	680	300	120
Oszczędność paliwa przy $\lambda = 1.2$, 1.6 %, przy pracy cyklicznej ok. 1.1 %			
Me = 24Nm, n = 2500 obr/min, Ne = 6.28 kW, cykl 120s/5s			
Skład (ppm)	1. Przed reaktorem	2. Za TWC	3. Za DeNO _x
CO	1100	720	0
THC	1650	1050	220
NO _x	1500	220	30
Oszczędność paliwa przy $\lambda = 1.2$, 6.6 %, przy pracy cyklicznej ok. 6.1 %			
Me = 41Nm, n = 2500 obr/min, Ne = 10.7 kW, cykl 120s/20s			
Skład (ppm)	1. Przed reaktorem	2. Za TWC	3. Za DeNO _x
CO	190	100	0
THC	1500	800	210
NO _x	2450	1000	360
Oszczędność paliwa przy $\lambda = 1.2$, 5.4 %, przy pracy cyklicznej ok. 4.0 %			
Me = 24Nm, n = 3500 obr/min, Ne = 8.8 kW, cykl 120s/10s			
Skład (ppm)	1. Przed reaktorem	2. Za TWC	3. Za DeNO _x
CO	1300	100	50
THC	2250	250	140
NO _x	1150	80	20
Oszczędność paliwa przy $\lambda = 1.2$, 5 %, przy pracy cyklicznej ok. 4.2 %			
Me = 41Nm, n = 4500 obr/min, Ne = 19.3 kW, cykl 30s/5s			
Skład (ppm)	1. Przed reaktorem	2. Za TWC	3. Za DeNO _x
CO	520	60	0
THC	1600	100	20
NO _x	2900	600	1200
Oszczędność paliwa przy $\lambda = 1.2$, 5.7 %, przy pracy cyklicznej ok. 4.3 %			

Tab. 8.1. Zestawienie wyników badań.

Z tabeli 8.1. wynika, że w zakresie średnich obciążeń i średnich prędkości obrotowych można spodziewać się zmniejszenia zużycia paliwa od 4 do 6.1 %. W warunkach pracy silnika, kiedy $Me = 12 \text{ Nm}$ i $n = 2500 \text{ obr/min}$ zmniejszenie zużycia paliwa przy pracy silnika na mieszance $\lambda = 1.2$ w stosunku do $\lambda = 1$ wyniosło jedynie 1.6 %. Dlatego też średnie zużycie paliwa wyniosło ok. 1.1 % mniej niż przy zasilaniu mieszanką stechiometryczną. Jednak ze względu na niewielkie stężenia NO_x w tych warunkach, okresy oczyszczania mogłyby zostać skrócone poniżej 5 sekund dla okresu magazynowania wynoszącego 120 sekund, co spowodowałoby dodatkowe, choć niewielkie, oszczędności paliwa.

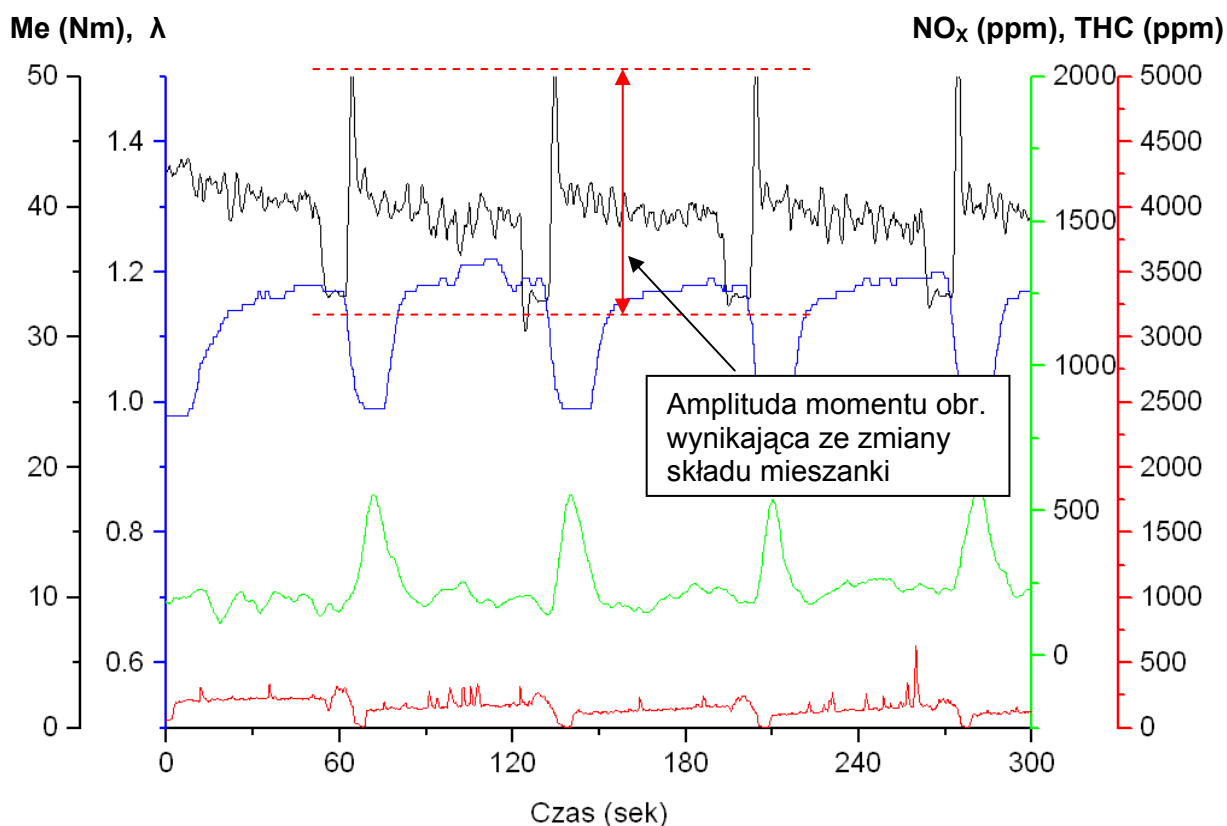
Nie udało się zredukować emisji tlenków azotu reaktorem magazynującym do poziomu osiąganego przy pracy silnika na mieszance stechiometrycznej przy wysokich obciążeniach ($Me = 41 \text{ Nm}$) i wysokich prędkościach obrotowych ($n = 4500 \text{ obr/min.}$). Niezależnie od proporcji cyklu magazynowania-oczyszczania tlenków azotu, ograniczenie stanowiła zbyt mała zdolność magazynowania reaktora przy dużych strumieniach spalin. Na rys. 8.12. widać, że mimo krótkich, 30-to sekundowych cykli magazynowania tlenki azotu szybko zaczynały pojawiać się za reaktorem.



Rys.8.12. Zdolność oczyszczania spalin z tlenków azotu przy sterowaniu cyklicznym składu mieszanki w cyklach 30s/5s czy 30s/3s, ($n = 4500 \text{ obr/min}$, $Me = 41 \text{ Nm}$).

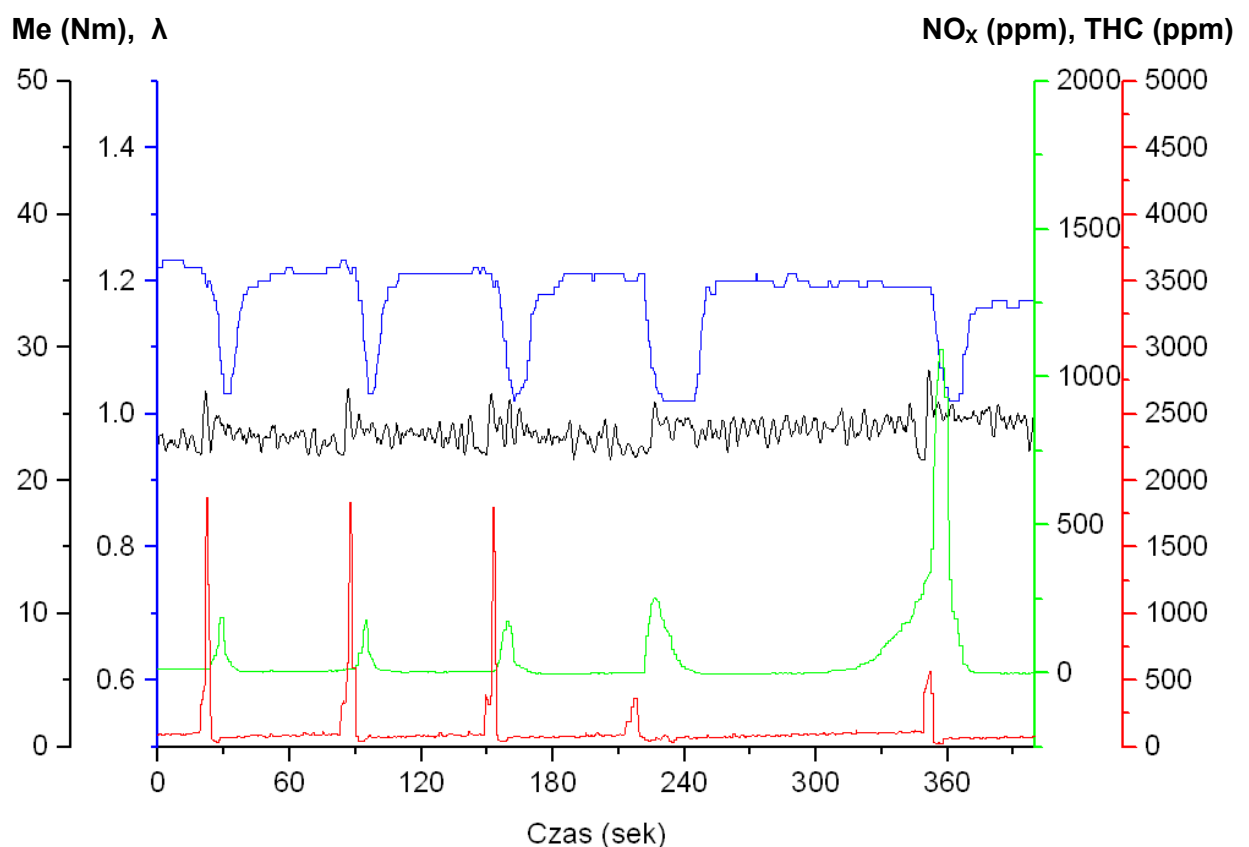
Mała skuteczność reaktora, w obszarze, w którym moc silnika wynosi około 19 kW, może być związana również ze zbyt dużą prędkością przepływu spalin, dodatkowo zmniejszającą zdolność przechwytywania NO_x przez reaktor katalityczny. Jednak silniki, w których reaktor ten jest stosowany, przy obciążeniu powyżej kilkunastu kW przechodzą w tryb zasilania jednorodną, stechiometryczną mieszanką a reaktor magazynujący pełni jedynie funkcję dodatkowego trójdrożnego reaktora katalitycznego.

Podczas projektowania sterownika zwrócono również uwagę na utrzymanie stałej wartości momentu obrotowego silnika przy przejściach z ubogiej na bogatą mieszankę. W czasie jazdy samochodu zmiany wartości momentu skutkowałyby wyraźnymi szarpnięciami w układzie napędowym związanymi ze zmianą obciążenia. Tego typu zjawiska, związane z efektami dźwiękowymi oraz drganiami wywoływanymi przez pracę silnika, nazywane są w literaturze jako NVH – Noise Vibration Hardness (Hałas Wibracje Twardość pracy), występują szczególnie w silnikach z wtryskiem bezpośrednim, pracujących cyklicznie na uwarstwionych i jednorodnych mieszankach. Na rys. 8.13. przedstawiono pracę cykliczną badanego silnika przy mieszankach o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1$ i 1.2, przy zmianie jedynie składu mieszanki ze stałym otwarciem przepustnicy.



Rys.8.13. Niestabilność momentu obrotowego przy zmianie składu współczynnika $\lambda = 0.95$ i 1.2 w cyklach 60s/10s. ($M_e = 41 \text{ Nm}$, $n = 2500 \text{ obr/min.}$)

Mimo wysokich wartości momentu obrotowego, jego amplituda zmian, zwiększona dodatkowo bezwładnością układu silnik-hamulec-układ sterowania, wynosiła aż 30 %. Dlatego niewystarczająca jest zmiana dawki paliwa, dzięki której można uzyskać odpowiedni skład mieszanki, bez jednoczesnego ustabilizowania wartości momentu obrotowego przez korekty otwarcia przepustnicy. W czasie badań regulacja silnika była dwuparametrowa tzn. zmianie czasu otwarcia wtryskiwacza towarzyszyła jednocześnie zmiana otwarcia przepustnicy, w stopniu minimalizującym różnicę obciążenia silnika. Na rys. 8.14. przedstawiono przebiegi toksycznych składników spalin oraz momentu obrotowego przy cyklicznej zmianie składu mieszanki i synchronicznej korekcji stopnia otwarcia przepustnicy. Uzyskano taki stan, że mimo niższej wartości momentu obrotowego, kiedy silnik jest bardziej wrażliwy na zmiany w procesie sterowania, stałość momentu obrotowego została utrzymana w granicach tolerancji regulatora.



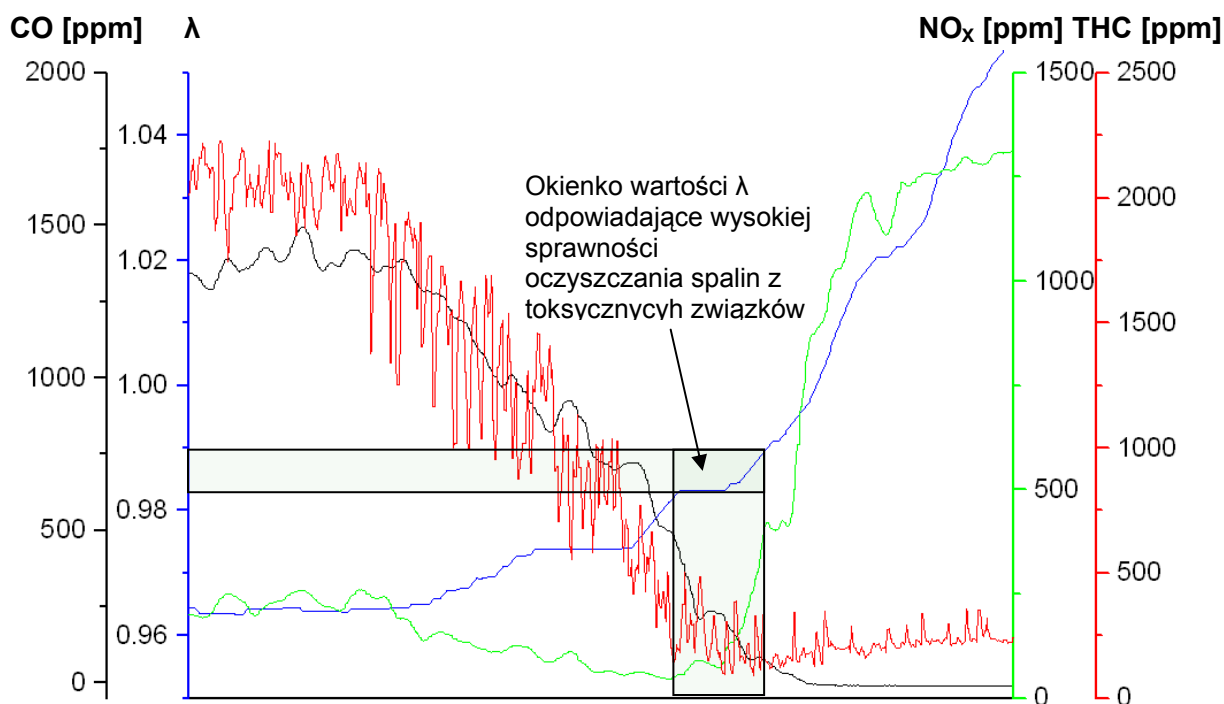
8.14. Wykres zmniejszonych fluktuacji momentu obrotowego przy zmianie współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 0.95$ i 1.2 oraz synchronicznym sterowaniu otwarciem przepustnicy.

Cykle różne ($Me = 24Nm$, $n = 3500$ obr/min.)

9. Porównanie działania katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x i katalitycznego reaktora TWC pracujących w układzie wylotowym silnika zasilanego benzyną oraz propanem-butanem.

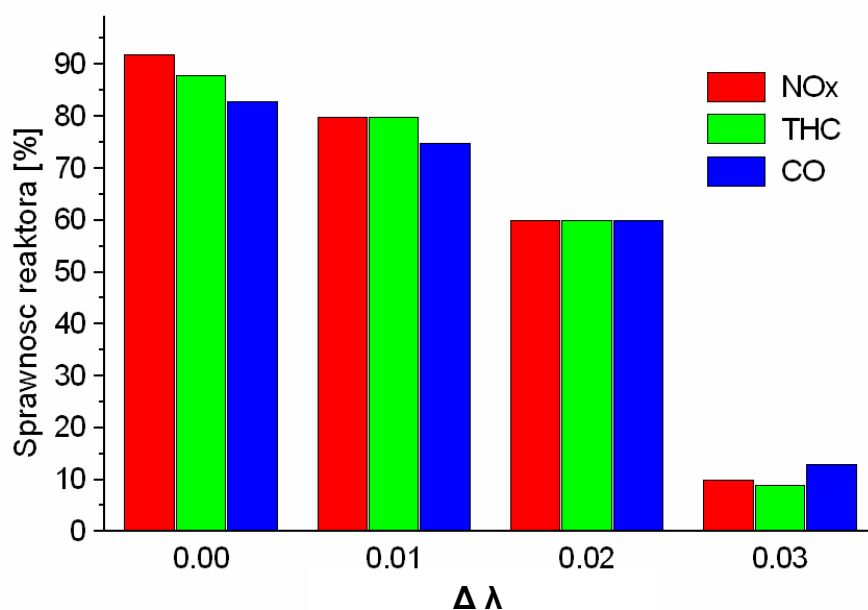
Badania miały na celu wykazanie możliwości obniżenia zużycia paliwa przez silnik ZI przy jednoczesnym zachowaniu emisji szkodliwych składników spalin na poziomie charakterystycznym dla silnika z jednopunktowym wtryskiem propanu-butanu wyposażonym w katalityczny reaktor trójfunkcyjny (TWC).

Przy stosowaniu mieszanki paliwowo-powietrznej o wartości współczynnika nadmiaru powietrza w zakresie $\lambda = 1.1 - 1.2$ można uzyskać kilkuprocentowe zmniejszenie zużycia paliwa w porównaniu do zasilania silnika mieszanką stechiometryczną. Jednak ze względu na limity zawartości toksycznych składników spalin wymagane jest stosowanie w układzie wylotowym silnika katalitycznego reaktora trójfunkcyjnego (TWC). Aby reaktor TWC mógł prawidłowo pracować konieczne jest zasilanie silnika mieszanką stechiometryczną. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych przez autora wynika, że katalityczny reaktor trójfunkcyjny charakteryzuje się wysoką redukcją toksycznych składników spalin w bardzo wąskim zakresie składu mieszanki. Rys. 9.1. przedstawia stężenie toksycznych składników spalin za reaktorem TWC przy zasilaniu propanem-butanem w przedziale $\lambda = 0.97 - 1.03$.



Rys.9.1. Stężenie toksycznych składników spalin za katalitycznym reaktorem TWC w przedziale $\lambda = 0,97 - 1,03$ przy zasilaniu silnika propanem-butanem.

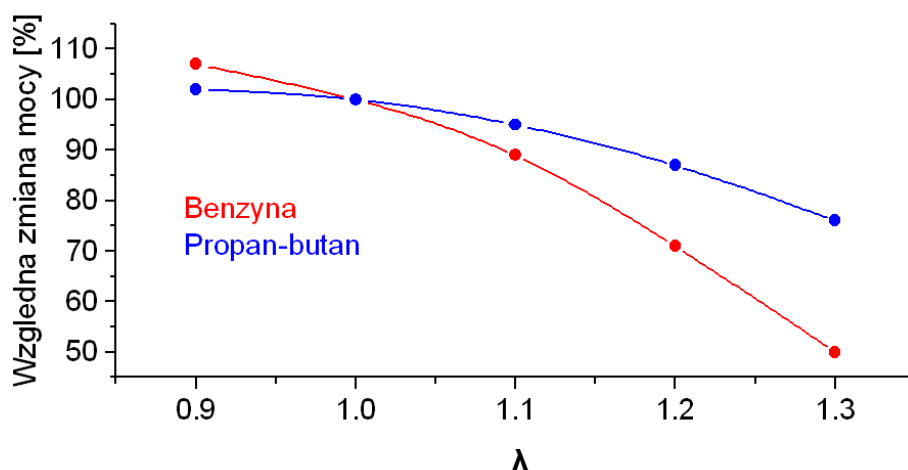
W przypadku zasilania gazem najwyższą sprawność reaktora osiąga się przy zasilaniu mieszankami o składzie nieco wzbogaconym w paliwo ($\lambda = 0.98 - 0.99$). Maksymalna sprawność reaktora określana jako różnica stężeń mierzonych składników spalin przed i za reaktorem, przekroczyła 90 %. Jednak taką wartość uzyskano tylko przy $\lambda = 0.982$. W rzeczywistych warunkach eksploatacji silnika, w procesie regulacyjnym, nie jest możliwe precyzyjnie utrzymanie określonej wartości λ . Wypadkowa sprawność reaktora kształtuje się, w zależności od odchyłeń od wartości odpowiadającej maksymalnej całkowitej sprawności reaktora, tak jak to przedstawiono na rysunku 9.2. po scałkowaniu stężeń toksycznych składników spalin z rys.9.1.



Rys. 9.2. Sprawność katalitycznego reaktora TWC w zależności od odchylenia składu mieszanki $\Delta \lambda$ od wartości odpowiadającej jego największej sprawności.

Ze względu na wrażliwość sprawności reaktora TWC na skład mieszanki wymagane jest rozwijanie algorytmów sterujących pracą silników i układów oczyszczania spalin. W przypadku stosowania katalitycznego reaktora magazynującego DeNOx znacznie zmniejsza się wpływ odchyłek od odpowiedniego składu mieszanki na sprawność oczyszczania spalin w stosunku do układów z reaktorem TWC. Stosowanie reaktora DeNOx daje też możliwość, zasilania silnika ubogimi mieszankami i zmniejszenie całkowitego zużycia paliwa.

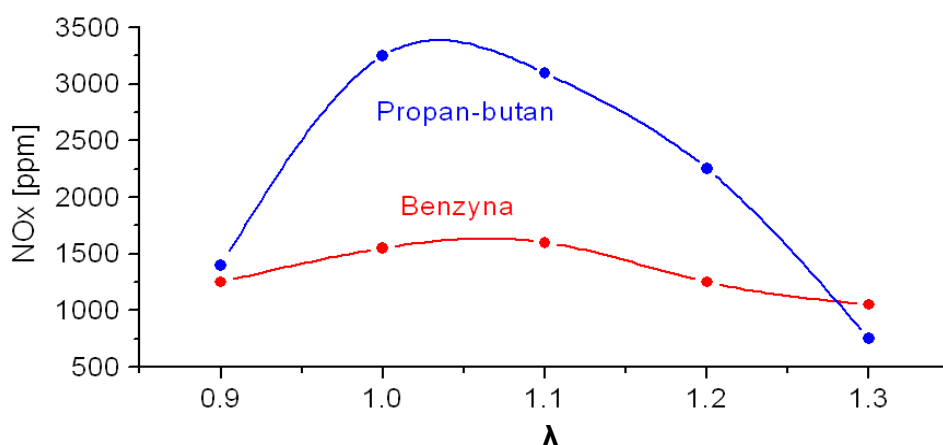
Na rys. 9.3. przedstawiono wpływ składu mieszanki na zmianę mocy silnika. Silnik jest mniej wrażliwy na jej skład w przypadku zasilania propanem-butanem niż przy zasilaniu benzyną. Wiąże się to z większą stabilnością procesu spalania ubogich mieszanek powietrzno-paliwowych propanu-butanu w porównaniu z benzyną.



Rys. 9.3. Porównanie procentowej zmiany mocy silnika przy zasilaniu benzyną oraz propanem-butanem w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza

Miedzy innymi ta cecha była podstawą podjęcia badań dotyczących możliwości zastosowania tego paliwa do napędu nowoczesnych silników spalinyowych.

Dla pewnych wartości współczynnika nadmiaru powietrza, przy zasilaniu propanem-butanem, emisja tlenków azotu jest nawet ponad dwukrotnie większa niż dla benzyny (rys.9.4). Wynikać to może z faktu, że mimo niższej maksymalnej temperatury spalania, ten proces dla propanu-butanu trwa dłużej. Przy zachowaniu podobnej sprawności reaktora trójfunkcyjnego wynikowa emisja NO_x przy zasilaniu propanem-butanem jest wyższa. Jeśli głównym celem byłoby spełnienie norm emisji toksycznych składników spalin, ustalonych dla benzyny, mogłoby się okazać, że zastosowanie katalitycznego reaktora trójfunkcyjnego przy zasilaniu mieszanką stechiometryczną propanu-butanu, nie gwarantuje osiągnięcia żądanych limitów.



Rys. 9.4. Porównanie stężenia tlenków azotu przed reaktorem TWC, przy zasilaniu silnika benzyną oraz propanem-butanem w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza.

Wskutek zubożenia mieszanki, emisja NO_x w silniku zasilanym propanem-butanem gwałtownie spada osiągając przy $\lambda = 1.3$ poziom jak przy zasilaniu benzynowym o tym samym składzie mieszanki. Jest to kolejny argument przemawiający za stosowaniem ubogiej mieszanki w przypadku silnika zasilanego propanem-butanem.

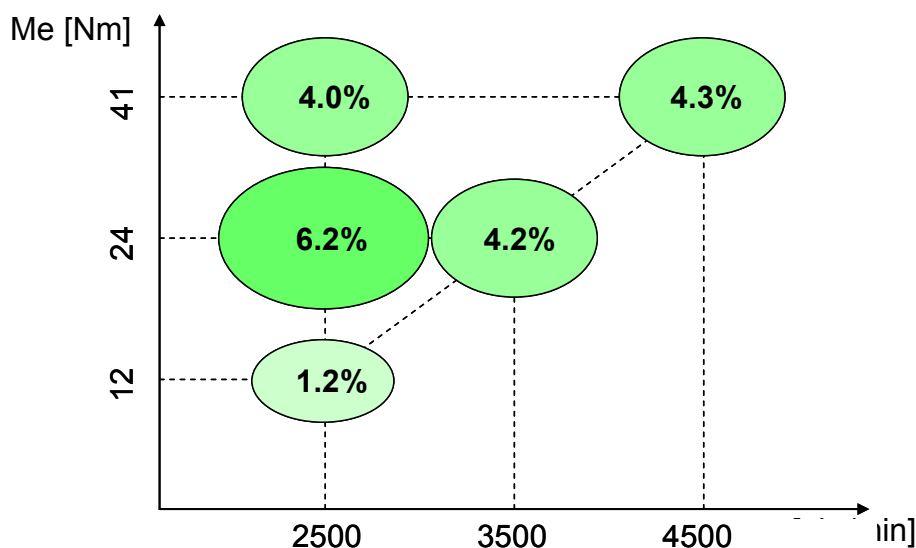
Cechą charakteryzującą układ zasilania silnika było zastosowanie wtrysku propanu-butanu do kolektora dolotowego w fazie ciekłej. Taka forma podawania paliwa występuje w układach zasilania gazem V-tej generacji. W związku z tym, przy okazji badań, wykazano zakres stosowalności tego systemu w przypadku popularnego, standardowego, silnika spalinowego ZI.

Istnieje szereg rozwiązań prowadzących do obniżenia zużycia paliwa przez silnik ZI co przedstawiono w rozdziale drugim. Ich skuteczność zależy w dużym stopniu od włożonych nakładów na badania rozwojowe oraz związanych z tym podwyższonych kosztów produkcji. W większości przypadków wiąże się to ze znacznym przekonstruowaniem silnika oraz stworzeniem nowego systemu sterowania. Również rozbudowie muszą ulec układy oczyszczania spalin. O wprowadzeniu określonego rozwiązania decydują w efekcie czynniki ekonomiczne zmuszające do szukania kompromisu pomiędzy kosztami produkcji a skutecznością danego rozwiązania. Ze względu na intensywne poszukiwania w różnych obszarach badań i konstrukcji silnika, rozwiązań obniżających zużycie paliwa, istnieje możliwość łączenia tych rozwiązań, które wpływają jednak nie addytywnie, na całkowitą sprawność.

W przypadku badanego przez autora pracy silnika dokonano niewielkich zmian w jego konstrukcji (rozdz. 6.2.), które w fazie produkcji nie podniosłyby znacznie kosztów wytwarzania. Jedynym, dodatkowym, kosztownym elementem jest katalityczny reaktor DeNO_x . Jednak ze względu na ciągły rozwój tej techniki, zastosowanie katalitycznych reaktorów magazynujących wydaje się, że będzie powszechne w niedalekiej przyszłości i wówczas można będzie mówić o korzystnym stosunku efektu do nakładów. Podstawowych zmian, także w fazie aplikacji, należy dokonać w systemie zarządzania pracą silnika.

Główna część badań dotyczyła określenia zakresu stosowalności katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x do oczyszczania spalin w przypadku zasilania silnika ubogą mieszanką propanu-butanu. Celem pracy było zmniejszenie zużycia paliwa przez silnik przy zasilaniu mieszanką paliwowo-powietrzną o składzie odpowiadającym największej sprawności silnika. Ze względu na własności reaktora magazynującego wymagane było zasilanie silnika mieszanką o cyklicznie zmieniającym się składzie. W czasie cyklu, podczas

którego reaktor magazynował tlenki azotu, silnik zasilany był mieszanką o wartości współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$. Po cyklu magazynowania następowało wzbogacenie mieszanki do wartości współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 0.95$, co powodowało uzyskanie znacznego stężenia tlenku węgla oraz węglowodorów i redukcję tlenków azotu w reaktorze. Przy odpowiednim dobraniu podczas badań długości cykli magazynowania i oczyszczania udało się uzyskać niski poziom emisji toksycznych składników spalin oraz zmniejszyć zużycie paliwa. Silnik badano dla różnych obciążeń i prędkości obrotowych odpowiadających najczęściej spotykanym w warunkach eksploatacji. Na rys. 9.5. przedstawiono procentowe zmniejszenie zużycia paliwa w badanych punktach pracy.



Rys.9.5. Zmniejszenie zużycia paliwa przez silnik podczas jego pracy dla zadanych parametrów – obciążenia i prędkości obrotowej

W przypadku niskich obciążeń ($Me = 12$ Nm, $n = 2500$ obr./min) zauważono niewielkie korzyści stosowania ubogiej mieszanki (1.2%). W obszarze dużych obciążeń oraz dużych prędkości osiągnięto oszczędność zużycia paliwa na poziomie 4 – 4.3%. Przy $Me = 41$ Nm i $n = 4500$ obr/min. nie udało się osiągnąć sprawności redukcji tlenków azotu przez zastosowany katalityczny reaktor magazynujący DeNOx takiej, jak dla katalitycznego reaktora trójfunkcyjnego, podczas pracy silnika na mieszance stechiometrycznej. Największą oszczędność paliwa (4.2 – 6.2 %) uzyskano w obszarze średnich obciążeń i średnich prędkości obrotowych utrzymując jednocześnie wystarczająco niski poziom tlenków azotu w spalinach (rys.8.8., rys.8.9.).

10. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej rozprawie doktorskiej rozważano możliwość zastosowania katalitycznego reaktora magazynującego tlenki azotu w silniku zasilanym ubogą mieszanką propanu-butanu z powietrzem. Zastosowanie katalitycznego reaktora magazynującego miało umożliwić uzyskanie stężenia toksycznych składników spalin, zwłaszcza tlenków azotu, na poziomie odpowiadającym stężeniu przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną i zastosowaniu katalitycznego reaktora trójfunkcyjnego.

Na podstawie przeglądu literatury i obecnie prowadzonych badań rozwojowych silników spalinowych na świecie, zaobserwować można, że główny nacisk kładzie się na zmniejszenie zużycia paliwa przez silnik oraz zmniejszenie zawartości toksycznych składników w spalinach. Zmniejszenie zużycia paliwa uzyskuje się przez zaawansowane systemy zwiększające sprawność silnika takie jak: downsizing, regulacja parametrów układu rozrządu, zmienny stopień sprężania, zmienna objętość silnika. Wtrysk bezpośredni, spalanie ubogich mieszanek czy zaawansowane systemy kontrolowanego samozapłonu zwiększają sprawność samego procesu spalania. Spalanie ubogich mieszanek pociąga za sobą poszukiwanie nowych metod oczyszczania spalin z tlenków azotu. Poza odpowiednią regulacją silnika czy zastosowaniem recyrkulacji spalin (EGR), wprowadzenie selektywnej katalitycznej redukcji tlenków azotu oraz katalitycznych reaktorów magazynujących stanowi główny kierunek rozwoju systemów oczyszczania spalin. Coraz powszechniej sięga się również po alternatywne źródła zasilania silnika spalinowego. W Polsce popularną alternatywą dla benzyny jest propan-butan.

Do badań autor przygotował stanowisko pomiarowe umożliwiające zasilanie silnika przez wtrysk ciekłego propanu-butanu do kolektora dolotowego i tworzenie mieszanki paliwowo-powietrznej o cyklicznie zmieniającym się współczynniku nadmiaru powietrza. Zastosowano również dozowanie propanu-butanu do układu wylotowego silnika, przed reaktor, jako źródło węglowodorów do redukcji tlenków azotu. Pomiary toksycznych składników spalin przeprowadzono dla katalitycznego reaktora zeolitowego i katalitycznego reaktora magazynującego tlenki azotu DeNOx. Porównano pracę reaktorów przy ciągłym strumieniu węglowodorów do układu wylotowego. Dla katalitycznego reaktora magazynującego tlenki azotu przeprowadzono pomiary jednostkowego zużycia paliwa oraz stężenia toksycznych składników spalin z cyklicznie zmieniającym się składem mieszanki w cyklach magazynowanie-oczyszczanie w różnych punktach pracy silnika.

10.1. Wnioski z przeprowadzonych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań udało się udowodnić tezę pracy oraz przedstawić następujące wnioski:

1. W przypadku zastosowania katalitycznego reaktora zeolitowego przy wtrysku ciągłym węglowodorów przed reaktor i zasilaniu silnika ubogą mieszanką propanu-butanu z powietrzem o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.1$, uzyskano niewielką sprawność redukcji NO_x ok. 10 %.
2. W przypadku katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x przy ciągłym wtrysku węglowodorów przed reaktor i zasilaniu silnika ubogą mieszanką propanu-butanu z powietrzem o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.1$, sprawność redukcji tlenków azotu utrzymywała się na poziomie ok. 9 %. Jednak ze względu na wymaganie cyklicznej pracy reaktora nie należało się spodziewać bardziej korzystnych efektów.
3. Przeprowadzone badania potwierdziły użyteczność stosowania katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x przy pracy w cyklach magazynowania-oczyszczania do oczyszczania spalin z toksycznych składników przy zmniejszeniu całkowitego zużycia paliwa przez silnik podczas zasilania ubogą mieszanką propanu-butanu z powietrzem o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.2$. Największe korzyści uzyskano przy średnich obciążeniach i średnich prędkościach obrotowych (m.in. $n = 2500$ obr/min. i $M_e = 24$ Nm) uzyskując ok. 5-cio procentowe zmniejszenie zużycia paliwa przy takim samym poziomie emisji tlenków azotu, tlenku węgla i niespalonych węglowodorów jak przy pracy silnika bazowego zasilanego propanem-butanem.
4. Przy niewielkim obciążeniu silnika ($n = 2500$ obr/min i $M_e = 12$ Nm) nie udało się uzyskać zadowalających efektów zastosowania katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x przy pracy w cyklach magazynowania-oczyszczania. Przy niskich obciążeniach zmniejszenie zużycia paliwa o ok. 1% nie jest satysfakcjonującym rezultatem.
5. Przy dużych wartościach obciążenia i prędkościach obrotowych ($n = 4500$ obr/min. i $M_e = 41$ Nm) oraz wykorzystaniu katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x podczas

pracy w cyklach magazynowania-oczyszczania nie udało się osiągnąć wystarczająco niskiego stężenia tlenków azotu w spalinach. Czynnikiem ograniczającym jest zapewne mała powierzchnia magazynująca reaktora, którą można łatwo zwiększyć stosując większy reaktor. W całym polu pracy silnika, a zwłaszcza w tych jego obszarach, które odpowiadają codziennej eksploatacji może się okazać, że zwiększanie powierzchni czynnej reaktora nie jest konieczne.

6. Dla długich okresów oczyszczania katalitycznego reaktora magazynującego DeNO_x przy pracy w cyklach magazynowania-oczyszczania udawało się obniżyć emisję tlenków azotu do poziomu granicy czułości stosowanego analizatora spalin. Wiązało się to jednak ze zwiększeniem całkowitego zużycia paliwa. W przypadku, gdy celem ma być jak największa redukcja toksycznych składników spalin i spełnianie coraz surowszych norm, zastosowanie reaktora magazynującego może być dobrym rozwiązaniem.

7. W przypadku pracy cyklicznej katalitycznego reaktora magazynującego w cyklach magazynowania-oczyszczania stopień redukcji tlenków azotu zależy od stosunku długości cykli oczyszczania i magazynowania.

11. Zakończenie

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność stosowania katalitycznego reaktora magazynującego DeNOx jako skutecznej metody oczyszczania spalin z tlenków azotu przy zasilaniu silnika ubogą mieszanką propanu-butanu z powietrzem. Dzięki temu udało się wykorzystać zalety wynikające z zastosowania ubogiej mieszanki w celu obniżenia zużycia paliwa przez silnik.

Problem optymalnego wykorzystania reaktora magazynującego jest nadal sprawą otwartą. Należałoby przeprowadzić dalsze badania określające wpływ strumienia spalin, prędkości przepływu, oraz długości cykli na sprawność reaktora. Uwzględniając zmiany parametrów pracy silnika i zmiany warunków pracy układu oczyszczania spalin należałoby stworzyć strategię optymalizującą system pod względem zużycia paliwa oraz poziomu emisji toksycznych składników spalin.

Wyniki uzyskane w czasie przeprowadzonych badań można jeszcze w pewnych zakresach pracy silnika poprawić o ok. 1% (jednostek) przez optymalizację warunków procesu magazynowania i oczyszczania katalitycznego reaktora magazynującego DeNOx. Wiąże się to z dokładnym pomiarem czasu potrzebnego do oczyszczenia katalitycznego reaktora magazynującego DeNOx oraz stopniem wzbogacenia mieszanki zasilającej silnik. W tym celu należałoby przeprowadzić pomiary stężenia węglowodorów i tlenków azotu w układzie wylotowym silnika i aktualnego stanu katalitycznego reaktora magazynującego DeNOx, co będzie stanowić dane wejściowe do układu sprzężenia zwrotnego zastosowanego sterownika silnika

Autor planuje wykorzystać istniejące stanowisko i zdobyte doświadczenie do dalszych badań związanych z zasilaniem silnika propanem-butanem. Udowodniona w niniejszej pracy możliwość stosowania reaktora magazynującego jako skutecznej metody oczyszczania spalin z tlenków azotu w przypadku ubogich mieszanek paliwowo-powietrznych otwiera możliwości badań związanych z optymalizacją procesu ich spalania w silniku. Dotyczy to nie tylko poprawienia warunków pracy reaktora magazynującego, ale i zwiększenia powtarzalności obiegów oraz doskonalenia systemów sterowania pracą silnika i adaptacji, co przynieść może dodatkowe zmniejszenie zużycia paliwa, przy obniżonej emisji toksycznych składników spalin.

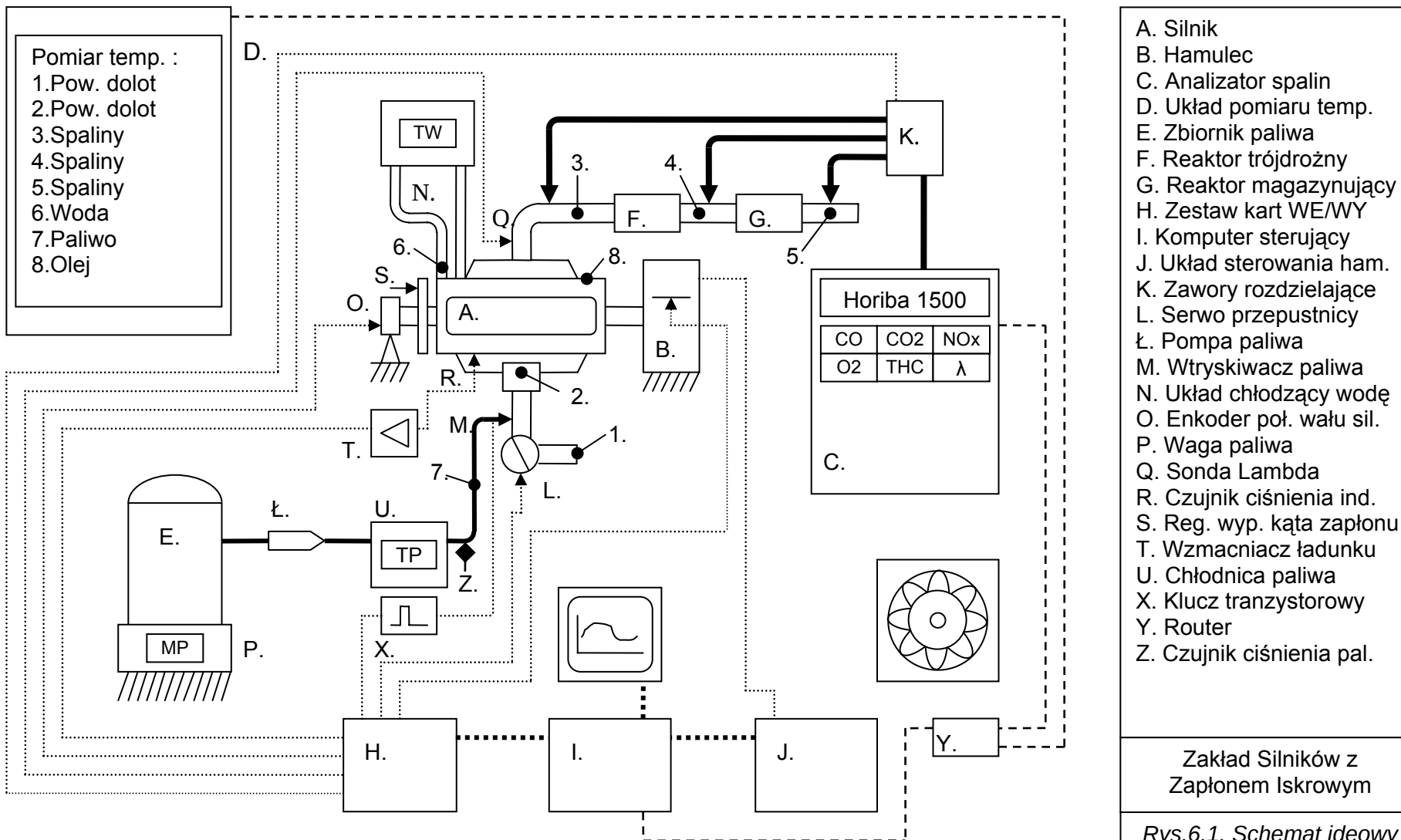
12. Bibliografia

1. Achleitner E., Berger S., Frenzel H., Klepatsch M., Warnecke V. – *Gasoline Direct Injection System with Piezo Injectors for Spray-Guided Combustion Processes* MTZ 5/2004.
2. Ademes N., Lang O., Lauer S., Salber W., Jene H. – *Valve Train Variability for Advanced Gasoline Engines*, MTZ 12/2005.
3. Ambrozik A., Kruczyński St., W., Łączyński J.: *Metody monitoringu trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych spalin*. Journal of KONES. Internal Combustion Engines, 2000, vol. 7, nr 1-2 s. 14-22.
4. Balis C., Barthelet P., Morreale C. – *Electronic Boosting Its Influence on Downsizing and Transient Torque* MTZ 9/2002.
5. Bandel W., Fraidl G.K., Freidl H., Kapus P. E. – *Gasoline Engine Technologies Focused on Multiple Benefit*, MTZ 02/2006.
6. Benedict K., Drexler G., Eder T., Eisenkoelbl M., Luttermann Ch., Schleusener M. - *Further Development of Fully-variable Valve Control System Valvetronic* MTZ 9/2005.
7. Birch S. – *Variations on a Theme by Saab* Automotive Engineering 4/2001.
8. Brandt S., Dahle U., Deebe M., Hochmuth J.K. – *Progress in the Development of Nox Adsorber Catalysts for DI Gasoline Engines* MTZ 2/2002.
9. Brohmer A., Kemmering J., Nehl J., Heuer S., Schafer E. – *NVH Development Aspects of DI Gasoline Engines* MTZ 11/2002 .
10. Citroen – Wszystkie typy , Zasilanie – zasada działania: system wtrysku bezpośredniego Hpi (Wtrysk benzyny pod wysokim ciśnieniem) Dokumentacja serwisowa nr.ref. BRE 0765 PL.
11. Darkowski A., Przyłuski J., Kruczyński S.: *Katalityczne usuwanie NO z gazów spalinowych silników Diesla przy użyciu węglowodorów jako reduktora*. Chemia i Inżynieria Ekologiczna, nr 1, 1997, s. 9-13.
12. Darkowski A., Przyłuski J., Maron E., Kruczyński S.: *Preparatyka i właściwości katalizatora do redukcji NO ze spalin silników z zapłonem samoczynnym*. KONES'97, s.157-163.
13. Denger D., Mischker K. – *The Electro-Hydraulic Valvetrain System* MTZ 12/2004.

14. Ecker H., Pishinger S. *Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren (FEV) w Aachen – Światowy instytut badawczy silników i pojazdów* Silniki Spalinowe 1/2006.
15. Engler B.H., Leyrer J., Lox E.S., Ostgathe K.: *Catalytic Reduction of NO_x with Hydrocarbons Under Lean Diesel Exhaust Gas Conditions*. SAE Transactions, 1993, nr 930735, s. 535-561.
16. Fraidl G. K., Piock W. F., Furhapter A., Unger E. M., Kammerdiener T. – *Homogenous Auto-Ignition- the Future of Gasoline Direct Injection?* MTZ 10/2002.23
17. Friedl H., Kapus P. *Kierunki Rozwoju Silników ZI* Silniki Spalinowe 2/2002.
18. Furhapter A., Piock W.F., Fraidl G.K. – *Homogenous Auto-Ignition Practical Use in Transient Full Engine Operation* 2/2004.
19. Geringer B., Klawatsch D., Graf J., Lenz H.P., Schuocker D., Liedl G., Piock W.F., Jetzinger M., Kapus P. – *Laser Ignition New Potential for Petrol Engine* MTZ 3/2004.
20. Golec K. – kierownik projektu badawczego pt.: *Poprawa sprawności i zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin tłokowego silnika spalinowego wyposażonego w reaktor katalizacyjny*, Politechnika Krakowska 2003.
21. Golloch R., Merker G.P. – *Internal Combustion Engine Downsizing*, MTZ 2/2005.
22. Górski A.: *Chemia*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN - Warszawa 1974.
23. Grzybowska-Świerkosz B.: *Elementy katalizy heterogenicznej*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN - Warszawa 1993.
24. Guilbert P., Morin C., Mokhatri S. – *Auto-Ignition Generate Combustion Part 2: Thermodynamic Fundamentals* MTZ 2/2004.
25. Held W., König A., Richter T., Puppe L.: *Catalytic NO_x Reduction in Net Oxidizing Exhaust Gas*. SAE Transactions, 1990, nr 900496, s. 209-215.
26. Hirao O., Pefley R.K.: *Present and Future Automotive Fuels*. Edit. John Wiley & Sons. USA, 1988.
27. Janach W., Husler I., Heini. K. -“*p Booster*” *amd Combined EGR and A-F Control for Turbocharged Gasoline Engines* MTZ 6/2002.
28. Jost K. *Spark Ignition Engine Trends* Automotive Engineering 1/2002.
29. Kemper H., Baumgarten H., Habermann K., Yapici K.I., Pishinger S. – *On the Road Towards Consequent Downsizing Engine with Continuously Variable Compression Ratio in a Demonstration Vehicle* MTZ 5/2003.

30. Knecht A., Stephan W., Hannibal W.- *"Vane CAM" – The Third generation of Camshaft Adjustment Systems* MTZ 4/2002.
31. Krebs R., Szengel R., Middendorf H., Fleish M., Laumann A., Voeltz S. – *The New Dual Charged FSI Petrol Engine by Volkswagen* MTZ 11/2005.
32. Krebs R., Szengel R., Middendorf H., Sperling H., Siebert W., Theoblad J., Michels K. – *The New Dual Charged FSI Petrol Engine by Volkswagen* MTZ 12/2005.
33. Kruczyński S. W. *Perspektywy Rozwoju Reaktorów Katalitycznych w Zastosowaniu do Silników Spalinowych V* Symposium Naukowo-Techniczne, Silniki Spalinowe w Zastosowaniach Wojskowych, część II, Jurata 2001.
34. Kruger M., Nisius P., Scholz V., Wiartalla A. *A Compact Solid SCR System for NOx Reduction in Passenger Cars and Light Duty Trucks*. MTZ 6/2006.
35. Melbert J., Raupach C., Wang Q., Niestroj F. – *Piezo Actuators for Automotive Injection Systems* MTZ 3/2006.
36. Merkisz J. – *Tendencje rozwojowe silników spalinowych*, Silniki Spalinowe, Nr 1/2004 (118).
37. Merkisz J., Mazurek St. – *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*, WKiŁ, Warszawa 2004.
38. Nazimek D.: *Metale VIII grupy układu okresowego jako katalizatory procesów redukcji tlenków azotu*. Ogólnopolskie Seminarium na temat Katalitycznej Dezaktywacji Tlenków Azotu. Rabka 1994, s. 35-44.
39. Niewiarowski K. *Tłokowe Silniki Spalinowe*. WKiŁ Warszawa 1983.
40. Parvulescu V.I., Grange P., Delmon B.: *Catalytic removal of NO*. Catalysis Today, 1998, nr 46, s. 233-316.
41. Pischinger S., Geiger J., Bowning R., Neff W., Kosh H.J., Thiemann J. – *The Influence of Ignition and In-Cylinder Flow on the Combustion of Highly Diluted Mixtures in SI Engines* MTZ 5/2002.
42. Pishinger S. *Verbrennungsmotoren*.
43. Pishinger S., Geiger J., Ballauf J., Vogt B., Grunefeld G., Greis A. – *The Inflammation Behaviour of a DI Gasoline Engine* MTZ 2/2002.
44. Pottker S., Eckert P., Merker G.P.– *Homogeneous Charge Compression Ignition with Synthetic Fuels* MTZ 12/2005.
45. Roby R., J., Bowman C., T.: *Formation of N₂O in Laminar, Premixed, Fuel-rich Flames*. Combustion and Flame. 1987, vol. 70, s. 119-123.

46. Sadykov V.A., Beloshapkin S.A., Paukshtis E.A., Alikina G.M., Kochubei D.I., Degtyarev S.P., Bulgakov N.N., Veniaminov E.V., Netyaga E.V. Bunina E.V., Kharlanov A.N., Lunina E.V., Lunin V.V, Matyshak V.A., Rozovskii A.Ya.: *Strongly Bound Nitrite-Nitrate Species as Intermediates in NO_x HC-SCR: Main Features of the Reaction Mechanism and Some Consequences to Catalysts Design*. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 6, supl. 1997, s. 21-34.
47. Sheid E., Speckens F. W. – *25 Years of FEV Supporting the Present, Developing the Future*. MTZ 10/2003 .
48. Środa B.: *Emisja tlenków azotu przy spalaniu paliw gazowych w złożu fluidalnym*. Praca doktorska nr 20/99. Politechnika Krakowska, Kraków 1999.
49. Stan C. – *Future Trends in Development of Spark Ignition Engines* MTZ 10/2002.
50. *The Measurement and Automation Catalog*. National Instruments 2003.
51. Tłaczała W.: *ŚrodowiskoLabVIEW w eksperymencie wspomaganym komputerowo*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 2002.
52. Trego L. – *VW Exhaust Aftertreatment by OMG* Automotive Engineering 4/2002.
53. Tremmel O., Segemann J., Rolle T., Pape J., Merker G.P. – *Variable Injection Systems Used as Development Tools to Optimise Direct-Injection Spark-ignition Engines* MTZ 6/2005.
54. VW – *materiały informacyjne*.
55. Wilber R.A., Boehman A.L.: *Numerical modeling of the reduction of nitric by ethylene over Cu-ZSM-5 under lean conditions*. Catalysis Today, 1998, nr. 50, s. 125-132.
56. Yamaguchi J. – *Japan Stays on High-Tech Course* Automotive Engineering 9/2003.
57. Yamaguchi J.: *Lexus gives V6 Dual Injection* Automotive Engineering 1/2006.
58. Ziólek M., Nowak I.: *Kataliza Heterogeniczna-wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1999.



Rys.6.1. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego