

## The influence of engine control parameters on engine performance

*Summary: The paper presents measurements which have been carried out for the CI engine with Common-Rail direct injection system, supercharged by a turbo compressor. The following parameters have been measured: concentration of toxic components, pressure courses in the cylinder, engine parameters such as power, torque, fuel consumption, temperature and pressure in the engine equipment system. The measurements were performed for a wide range of engine load and possible recirculation degrees in various operating condition. The fuel dose was divided into the pre and main doses. Standard injection advanced angle increased and decreased by two and four degree was used.*

Key words: CI engine, engine control parameters, engine performance

## Wpływ parametrów regulacyjnych silnika ZS na wybrane wskaźniki pracy

*Streszczenie: W referacie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych silnika ZS dla różnych wartości parametrów regulacyjnych. Badania przeprowadzono na silniku o pojemności skokowej 1.3 dm<sup>3</sup>, zasilanego systemem C-R, przeznaczonym do samochodu osobowego. Badania przeprowadzono dla 4 wartości prędkości obrotowej 1500, 2500, 3500, 4000 obr/min oraz 5 wartości momentu obrotowego 25, 50, 75, 90, 100% Mmax. Dla każdego punktu pomiarowego zmieniano wartość kąta wyprzedzenia wtrysku oraz wartość stopnia recyrkulacji spalin. Do zmiany algorytmów sterujących pracą silnika zastosowano specjalne oprogramowanie. Ogółem badania przeprowadzono dla ponad 450 zestawów parametrów regulacyjnych. Jako wartość odniesienia przyjęto osiągi silnika dla standardowych wartości parametrów regulacyjnych. Podczas badań rejestrowano podstawowe parametry pracy silnika, przebiegi ciśnienia w cylindrze silnika oraz zawartość składników spalin. Analizie poddano emisję szkodliwych składników spalin oraz sprawność ogólną silnika. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów, wskazano na wzajemne powiązania i ograniczenia w sterowaniu osiągnięciami silnika ZS.*

Praca powstała w ramach projektu finansowanego przez MNiSzW.

Słowa kluczowe: silnik ZS, parametry regulacyjne, wskaźniki pracy

### 1. Wstęp

Jednym z podstawowych czynników decydujących współcześnie o rozwoju tłokowych silników spalinowych jest dążenie do ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne [1], [6], [7], [8]. Coraz ostrzejsze limity emisji toksycznych składników spalin i zużycia paliwa, a także duże wymagania ekologiczne dotyczące eksploatacji pojazdów z silnikami spalinowymi, zmuszają konstruktorów do stałego doskonalenia konstrukcji silników [7], [8].

W celu obniżenia toksyczności spalin silnika o zapłonie samoczynnym podejmowano działania, które zmierzały w czterech głównych kierunkach [7]:

- wprowadzenie regulacji i sterowania zespołów silnika, mających wpływ na jego cykl roboczy,
- zastosowanie określonych rozwiązań konstrukcyjnych silnika,
- zastosowanie odpowiednich rodzajów paliw i specjalnych dodatków do paliw,
- wyposażenie silnika w katalizatory i filtry spalin.

Regulacja i sterowanie zespołami silnika mającymi wpływ na cykl roboczy silnika oznacza wprowadzenie sterowania układem zasilania silni-

ka. W skład układu zasilania współczesnego silnika wchodzi: układ wtryskowy, układ wymiany ładunku z turbosprężarką i chłodnicą powietrza dolotowego oraz układ recyrkulacji spalin.

Współczesnym konstrukcjom silników o zapłonie samoczynnym stawia się jako równorzędne użytkowym, wymagania dotyczące spełnienia obecnych i przyszłościowych wymagań legislacyjnych dotyczących emisji składników spalin, w tym głównie emisji tlenków azotu oraz cząstek stałych [1], [6], [8].

W najbliższych latach przewiduje się dalszy rozwój doładowanych silników o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim, wyposażonych w złożone algorytmy regulacji układów zasilania.

W algorytmach sterujących uwzględnia się głównie następujące podstawowe parametry regulacyjne silnika:

- prędkość obrotową,
- dawkę paliwa i przebieg jej wtrysku,
- kąt wyprzedzenia wtrysku,
- stopień recyrkulacji spalin,
- ciśnienie ładunku w kolektorze dolotowym,
- temperaturę ładunku w kolektorze dolotowym.

O wadze i aktualności zagadnienia regulacji parametrów zasilania silnika o zapłonie samoczyn-

nym świadczy wzrastająca z każdym rokiem liczba publikacji w literaturze światowej z tego zakresu. Publikacje te dotyczą problematyki teoretycznej i praktycznej w zakresie regulacji zasilania silników o zapłonie samoczynnym, jak i eksploatacji silników wyposażonych w złożone, niekonwencjonalne układy regulacji.

## 2. Badania

Podstawowym etapem prac, związanym z doborem parametrów regulacyjnych, które umożliwiają realizację założonych celów sterowania, jest pomiarowa identyfikacja obiektu badań [4], [5]. W rozważanym przypadku, badania eksperymentalne (identyfikacyjne) miały na celu określenie wpływu parametrów regulacyjnych silnika  $x_1, \dots, x_r$  na parametry pracy i osiągi silnika określone przez wielkości sumaryczne  $W_1, \dots, W_s$  (określające emisję składników toksycznych i zadymienie spalin), pomocnicze wielkości sumaryczne  $v_0, \dots, v_d$  (określające parametry cyklu roboczego) oraz przebiegi ciśnienia w cylindrze silnika  $p(\varphi)$ .

Badania identyfikacyjne zależności pomiędzy emisją tlenków azotu, węglowodorów i tlenku węgla oraz zadymieniem spalin a wartością parametrów regulacyjnych przeprowadzono na silniku o zapłonie samoczynnym, przeznaczonym i wykorzystywanym do napędu pojazdów osobowych, którego dane techniczne przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne silnika

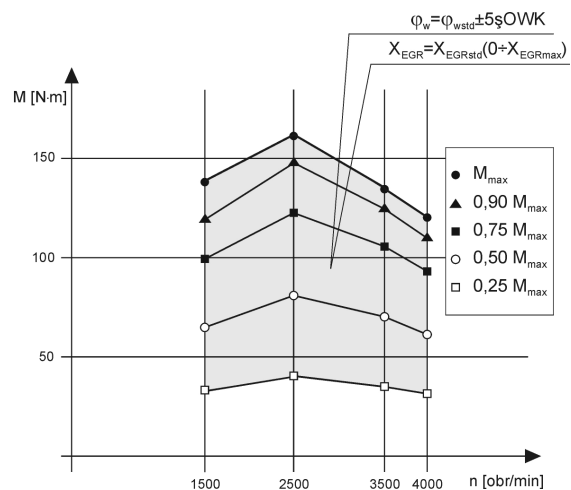
Typ silnika	silnik o zapłonie samoczynnym, układ zasilania C-R, doładowany zespołem turbosprężarkowym, z chłodzeniem powietrza doładowującego, z recyrkulacją spalin
Budowa / Liczba cylindrów	rzędowy / cztery
Rozrząd / Zawory na cylinder	dwa wałki rozrządu w głowicy / cztery
Średnica cylindra	69,6 mm
Skok tłoka	82 mm
Objętość skokowa	1248 cm <sup>3</sup>
Stopień sprężania	16,8
Moc maksymalna	55,2 kW przy 4000 obr/min
Moment obrotowy maksymalny	190 N·m przy 1500 obr/min

Badania zrealizowano na dynamicznej hamowni silnikowej składającej się z następujących urządzeń:

- hamulca dynamometrycznego typu AVL Dynoexact APA 202,
- systemu sterowania AVL PUMA OPEN 1.3,
- panelu kontrolnego stanowiska AVL EMCON 400.

Emisję składników szkodliwych spalin rejestrowano z użyciem zestawu analizatorów AVL CEB 200, wyposażonego w moduły analizatorów CLD, HFID oraz NDIR, a do pomiaru zadymienia spalin zastosowano dymomierz filtracyjny typu AVL 415S.

Realizacja założonych badań identyfikacyjnych wymagała zmiany standardowych parametrów pracy silnika. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono identyfikację emisji tlenków azotu, węglowodorów, tlenku węgla oraz zadymienia spalin w zależności od: prędkości obrotowej, dawki paliwa, stopnia recyrkulacji spalin i kąta wyprzedzenia wtrysku, przy czym zmiana trzech ostatnich parametrów wymaga ingerencji w oprogramowanie centralki sterującej silnika co zrealizowano wykorzystując oprogramowanie INCA V6.2 i urządzenie do przeprogramowania ECU - ETAS ES590. Zakres zrealizowanych badań identyfikacyjnych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat zakresu badań identyfikacyjnych

Należy tutaj podkreślić, że w całym zakresie realizowanych badań przedstawionych na rys. 1 dawka paliwa podawana była z podziałem na stałą, niezależną od punktu pracy silnika dawkę pilotującą oraz zmienną dawkę główną. Standardowy algorytm sterowania dawką wtrysku w badanym silniku zawiera bowiem różne, zależne od punktu pracy silnika, strategie przebiegu wtrysku. Uniemożliwia to jednoznaczny identyfikację emisji tlenków azotu, węglowodorów, tlenku węgla oraz zadymienia spalin w zależności od parametrów regulacyjnych silnika.

Opracowując program badań eksperymentalnych (identyfikacyjnych) wyznaczono punkty pomiarowe w taki sposób, aby przeprowadzić badania w możliwie szerokim obszarze pracy silnika. Wybrano do badań wartości prędkości obrotowej 1500, 2500, 3500 i 4000 obr/min. Punkty pomiarowe, w których zaplanowano badania silnika przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości prędkości obrotowej i obciążenia, przy których przeprowadzono badania identyfikacyjne

Prędkość obrotowa [obr/min]	Obciążenie [N·m]			
	1500	2500	3500	4000
$M_{max}$	139	162	137	120
$0,90 M_{max}$	120	148	126	110
$0,75 M_{max}$	99	123	105	92
$0,50 M_{max}$	66	82	70	61
$0,25 M_{max}$	33	41	35	31

$M_{max}$  - maksymalny moment obrotowy przy danej prędkości obrotowej.

Badania objęły pomiary parametrów pracy silnika, składników spalin oraz rejestrację przebiegów ciśnienia w cylindrze.. Badania przeprowadzono od najmniejszych do największych obciążeń silnika, oraz od najmniejszych do największych stopni recyrkulacji w każdym punkcie pomiarowym. Stopień recyrkulacji starano się zwiększać co 5% do czasu, w którym następował spadek momentu obrotowego. W momencie gdy zwiększenie  $X_{EGR}$  nie było możliwe o kolejne 5% szukano największej wartości, dla której było możliwe utrzymanie momentu obrotowego na wymaganym poziomie. Dla maksymalnych obciążeń system EGR był nie aktywny wykonywano wyłącznie zmianę kąta wyprzedzenia wtrysku. W trakcie przeprowadzonych badań silnik pracował z wykorzystaniem podziału dawki na dawkę pilotującą i główną.

Dla każdego z punktów wykonano pomiary przy standardowym kącie wyprzedzenia wtrysku (określonym przez fabryczny mikrokontroler sterujący pracą silnika) oraz dla kąta przyspieszonego i opóźnionego o 2 i 4°OWK w odniesieniu do wartości standardowej.

W całym zakresie obciążeń częściowych regulowano pracę silnika tak, aby uzyskiwać stałą prędkość obrotową i stałą wartość momentu obrotowego. Taka regulacja pozwoliła na analizę parametrów pracy silnika, przy stałym ciśnieniu efektywnym. Spadek (lub wzrost) momentu obrotowego wywołany zmianą kąta wyprzedzenia wtrysku oraz zmianą stopnia recyrkulacji był kompensowany przez zmianę dawki paliwa.

Dla obciążeń maksymalnych przyjęto standardową regulację dawki paliwa, realizowaną przez fabryczny mikrokontroler sterujący pracą silnika, uwzględniającą ilość powietrza dostarczanego do silnika (ograniczenie zadymienia spalin). Takie podejście umożliwiło określenie wpływu stopnia recyrkulacji i kąta wyprzedzenia wtrysku na maksymalne osiągi silnika.

Wyniki pomiarów eksperymentalnych (identyfikacyjnych) przeprowadzonych na stanowisku badawczym zestawiono w postaci tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki pomiarów identyfikacyjnych

Nr pomiaru	Parametry regulacyjne	Wielkości sumaryczne
0	$x_{1,0}, \dots, x_{r,0}$	$W_{1,0}, \dots, W_{s,0}$
:		
k	$x_{1,k}, \dots, x_{r,k}$	$W_{1,k}, \dots, W_{s,k}$
:		
P	$x_{1,P}, \dots, x_{r,P}$	$W_{1,P}, \dots, W_{s,P}$

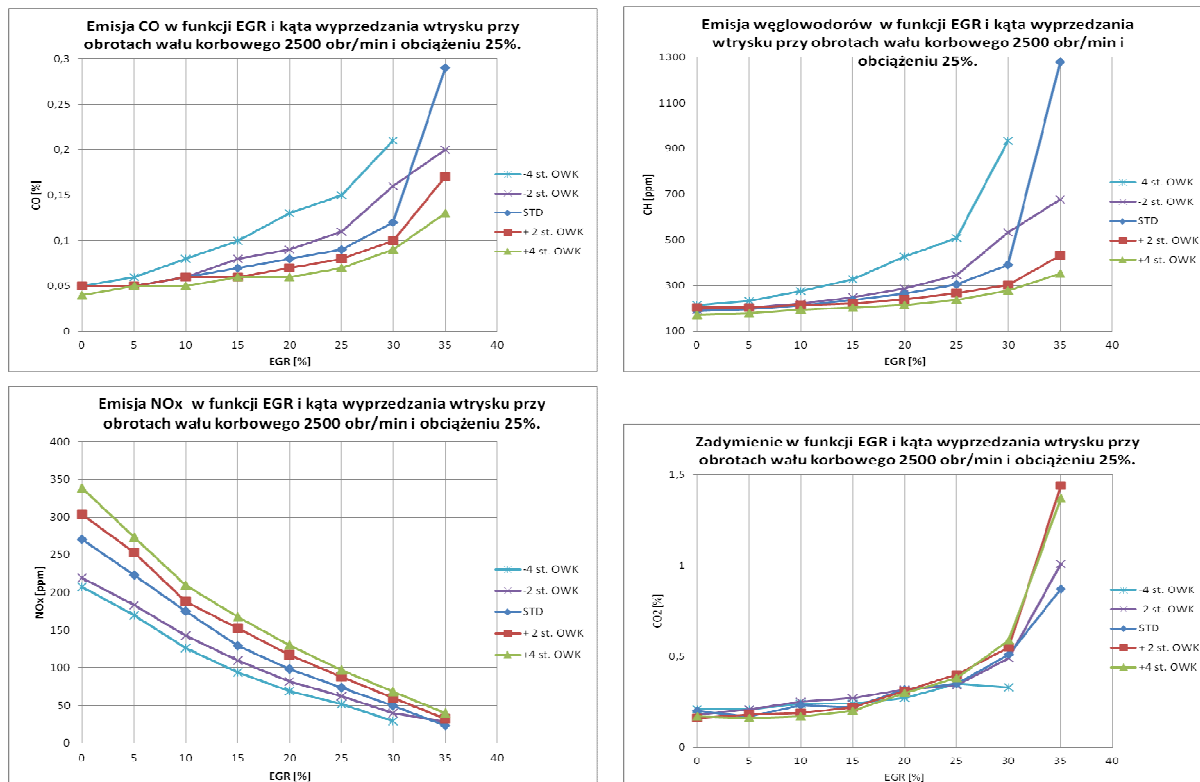
( $P + 1$  - liczba punktów pomiarowych)

W sumie przeprowadzono ponad 450 pomiarów, dla omówionych wyżej zestawów parametrów regulacyjnych silnika  $x_1 \div x_r$ .

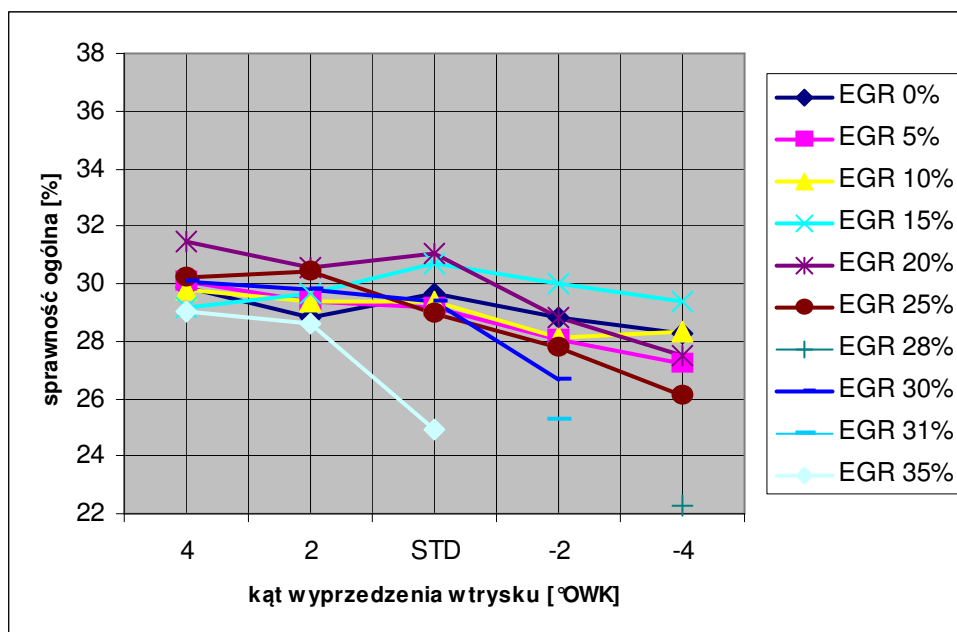
### 3. Analiza wyników badań

Na rys. 2 przedstawiono emisję związków szkodliwych spalin i zadymienie w funkcji stopnia recyrkulacji spalin i kąta wyprzedzenia wtrysku dla prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążenia 0,25  $M_{max}$ . Analogiczne zestawienia wyników badań wykonano dla pozostałych prędkości obrotowych i obciążeń silnika. Stężenie tlenu węgla w spalinach wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku powoduje wzrost stężenia tlenu węgla, natomiast wzrost stopnia recyrkulacji spalin powoduje istotny wzrost stężenia tlenu węgla w spalinach. Stężenie węglowodorów w spalinach nieznacznie maleje wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku powoduje nieznaczny wzrost stężenia węglowodorów, natomiast zwiększenie recyrkulacji spalin powoduje również nieznaczny wzrost stężenia węglowodorów w spalinach. Stężenie tlenków azotu w spalinach wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku powoduje znaczny spadek stężenia tlenków azotu, natomiast zwiększenie recyrkulacji spalin powoduje równoczesny istotny spadek stężenia tlenków azotu w spalinach. Stopień zadymienia spalin wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrysku nie powoduje wzrost stopnia zadymienia spalin, natomiast zwiększenie stopnia recyrkulacji spalin powoduje istotny wzrost stopnia zadymienia spalin.

Należy równocześnie zaznaczyć, że wysokie wartości stopnia recyrkulacji jak i zmniejszanie kąta wyprzedzenia wtrysku zmniejszają sprawność ogólną silnika co przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Emisja związków szkodliwych spalin i zadymienie w funkcji stopnia recyrkulacji spalin i kąta wyprzedzenia wtrysku dla prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążenia  $0,25 M_{max}$



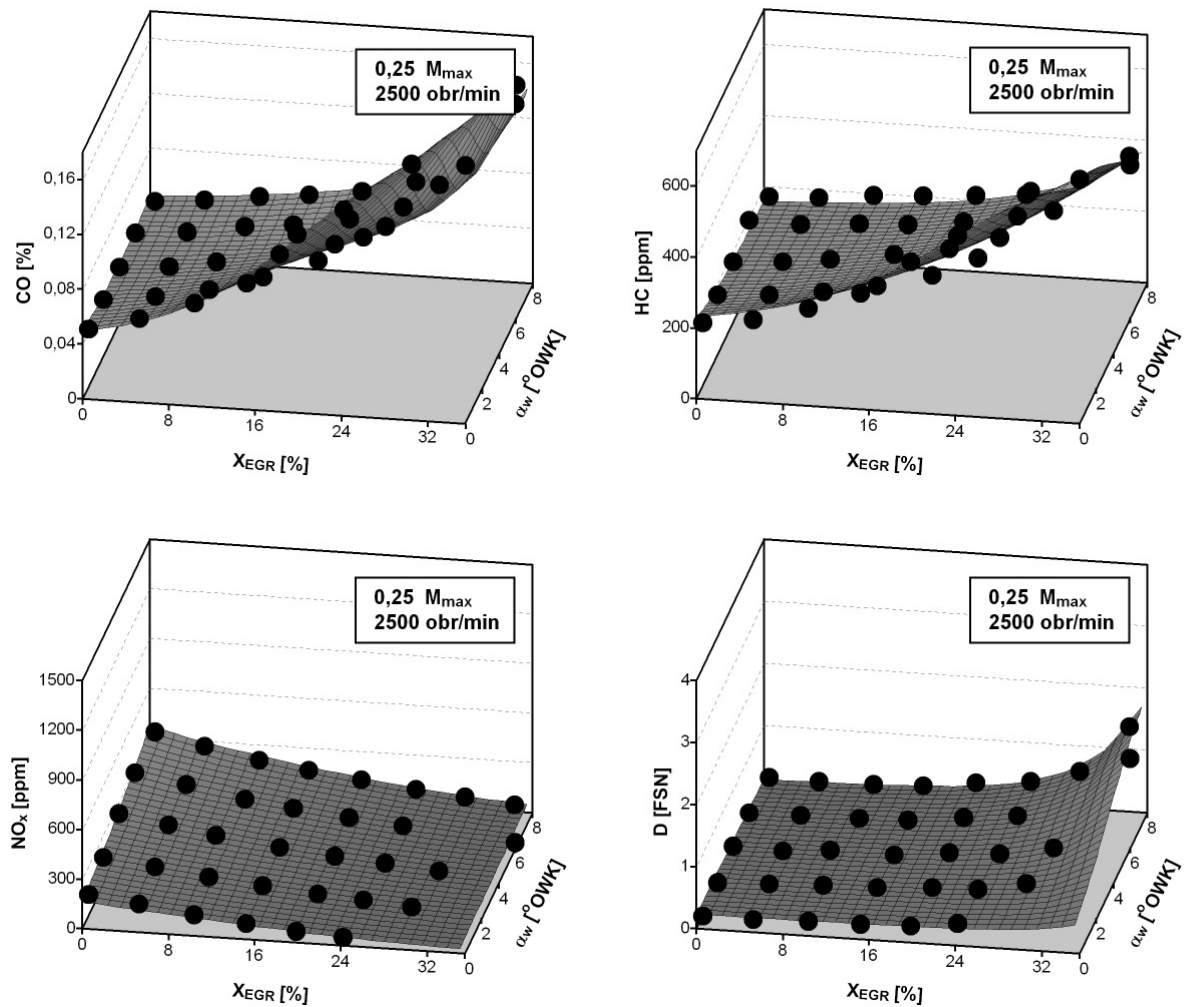
Rys. 3. Sprawność ogólna silnika w funkcji stopnia recyrkulacji spalin i kąta wyprzedzenia wtrysku dla prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążenia  $0,25 M_{max}$

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszej pracy postępowanie identyfikacyjne jest jednym z etapów przygotowania algorytmów sterowania parametrami regulacyjnymi w celu ograniczenia zadymienia i emisji

związków szkodliwych spalin [4], [5]. Uzyskane powierzchnie prezentujące aproksymowane wartości wyników badań eksperymentalnych zadymienia i emisji związków szkodliwych dla wybranej prędkości obrotowej i obciążenia przedstawiono na rys. 4. Widoczne na powierzchniach markery prezentują

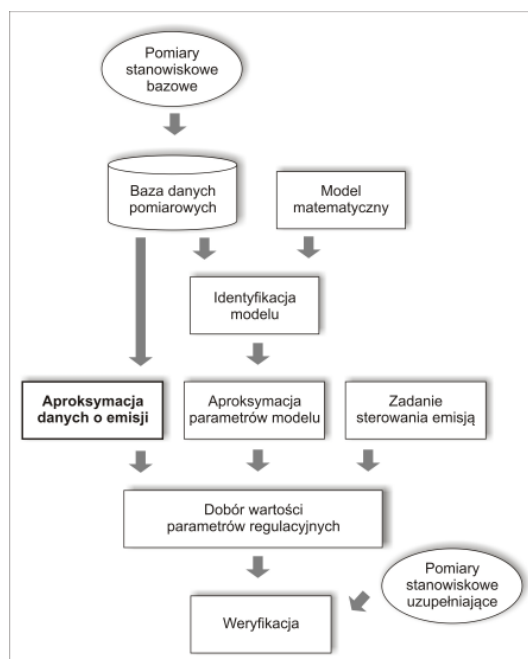
wartości dyskretne uzyskane w trakcie badań identyfikacyjnych.



Rys. 4. Powierzchnie aproksymujące zadywienie i emisję związków szkodliwych spalin wyznaczone z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych dla prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążenia  $0,25 M_{max}$

Docelową realizacją zadania sterowania emisją, zapewniającego jednocześnie utrzymanie parametrów trakcyjnych wymaga dodatkowo sformułowania modelu cyklu roboczego i rozwiązania zadania

optymalizacji poprzez odpowiedni dobór wartości parametrów regulacyjnych [2], [3], [4]. Schemat metodologii postępowania przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat metodologii postępowania w celu sformułowania i rozwiązania zadania sterowania emisją [5]

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

*C-R* system zasilania Common-Rail

*ZS* silnik o zapłonie samoczynnym

## Bibliography/Literatura

- [1] AVL, Regulations and Standards, Current and Future Exhaust Legislation, AVL, Graz 02.2004.
- [2] Brzozowska L., Brzozowski K., Nowakowski J.: An application of artificial neural network to Diesel engine modelling. IDAACS'2005 : Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application : Proceedings of the Third IEEE Workshop, Sofia 2005 s. 142-146.
- [3] Brzozowski K., Nowakowski J.: The model of compression ignition engine with artificial neural networks. Combustion Engines 1, 2008, s. 44-49.
- [4] Nowakowski J., Brzozowski K.: Numerical model and programme for simulating working process in the compression-ignition engine with EGR. Proceedings of the 12th European Automotive Congress EAEC, 1-18, Bratislava 2009.
- [5] Nowakowski J., Brzozowski K.: Mathematical model for simulation of a working cycle of compression-ignition engine based on experimental measurements. FISITA 2010 World Automotive Congress, Budapest, Hungary, 30 May - 4 June, 2010. abstract. - s. 229.
- [6] Ponti F., Corti E., Serra G., De Cesare M.: Common Rail Multi-Jet Diesel Engine Combustion Model Development for Control Purposes. SAE Paper 2007-01-0383.
- [7] Tomishima H., Matsumoto T., Oki M., Nagata K.: The Advanced Diesel Common Rail System for Achieving a Good Balance Between Ecology and Economy. SAE Paper 2008-28-0017.
- [8] Wang E.: Control System Design for Variable Nozzle Turbocharger. SAE Paper 2009-01-1668.

Mr Nowakowski Jacek, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at University of BielskoBiala.

*Dr hab. inż. Jacek Nowakowski – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej.*

