

## THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF CONTROL FUNCTION OF THE DIESEL ENGINE WITH AN ELECTRONIC GOVERNOR ON EMISSION OF EXHAUST GAS COMPONENTS

Mirosław Karczewski

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu  
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland  
tel.: +48 22 6837754, fax. +48 22 6837754  
e-mail: m.karczewski@wme.wat.edu.pl

### Abstract

The electronic control systems are generally applied in internal combustion (IC) engines at the present. Electronic governors make easy the achieving of progressive ecological requirements and maintenance the full efficiency of engines by diagnosing during work.

The estimation of toxic compounds emission and work economicalness of the engine with an electronic governor in unsteady states was the aim of presented paper. The investigation of influence of the governor parameters on toxic compounds emission and the work economicalness of engine in unsteady states of work was realized on a dynamometer stand. Characteristic runs of load of the engine were reconstructed. It was measured during exploitation investigations of track vehicle with an electronic control system. Continuous torque of the engine, fuel consumption as well as share of toxic components of exhaust gas: carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides and hydrocarbons were measured. Executed investigations confirmed dependence between parameters of governing and emission of toxic components of exhaust gases and this factor should be taken into consideration during selection of control function parameters. Decrease of the coefficient of amplification profitably influences on emission of toxic components of exhaust gas, however it causes decrease of fuel consumption as well as achievement of next control states is slower. Therefore final decision about value of the coefficient should be compromise between fuel consumption, and an engine influence on environment depending with his use. In result of repetitions of the engine working cycles with different parameters of the engine governing system was estimated. The most profitable, with dynamic and the fuel - efficient regards, strengthener coefficient of engine work  $KP = 0.00035$ , however the smallest concentration the nitrogen oxides  $NO_x$ , the carbon monoxide  $CO$  and carbon dioxide  $CO_2$  appears at the strengthener coefficient  $KP = 0.00025$ . The strengthener coefficient  $KP=0.0003$  assured very good dynamic properties of the engine with non enlarged concentration of toxic compounds in exhaust gases

**Keywords:** combustion engine, electronic control system, exhaust gas

## WPLYW PARAMETRÓW FUNKCJI STEROWANIA SILNIKIEM O ZS Z REGULATOREM ELEKTRONICZNYM NA EMISJĘ SKŁADNIKÓW SPALIN

### Streszczenie

Układy elektronicznego sterowania silnikami są obecnie powszechnie stosowane w tłokowych silnikach spalinowych. Regulatory elektroniczne w znacznym stopniu ułatwiają spełnienie wzrastających wymagań ekologicznych i utrzymanie pełnej sprawności silników przez ich diagnozowanie podczas pracy.

Celem prezentowanej pracy była ocena emisji związków toksycznych i ekonomiczności pracy silnika z regulatorem elektronicznym w nieustalonych stanach pracy silnika. Badania wpływu parametrów regulatora na emisję związków toksycznych i ekonomiczność pracy silnika w nieustalonych stanach pracy przeprowadzono na dynamometrycznym stanowisku badawczym. Odtwarzano charakterystyczne przebiegi obciążenia silnika, zmierzone podczas badań eksploatacyjnych pojazdu gąsienicowego z elektronicznym układem sterowania. Mierzono w sposób ciągły moment obrotowy silnika, godzinowe zużycia paliwa oraz udziały poszczególnych składników spalin: tlenku węgla, tlenków

azotu, węglowodorów oraz dwutlenku węgla. Wykonane badania potwierdziły zależności między parametrami regulacji a emisją toksycznych składników spalin i czynnik ten powinien być uwzględniany przy doborze parametrów funkcji sterowania. Zmniejszenie współczynnika wzmocnienia korzystnie wpływa na emisję toksycznych składników spalin, powoduje jednak zmniejszenie zużycia paliwa, a osiągnięcie kolejnych stanów jest wolniejsze. Dlatego ostateczna decyzja o wartości współczynnika powinna być efektem kompromisu między zużyciem paliwa przez silnik, wynikającym z jego zastosowania, a oddziaływaniem silnika na środowisko. W wyniku przeprowadzenia powtórzeń cykli roboczych silnika przy różnych parametrach układu regulacji oceniono, że najkorzystniejszym ze względów dynamicznych i ekonomicznych pracy silnika jest współczynnik wzmocnienia  $K_p=0.00035$ , natomiast najmniejsze stężenie tlenków azotu  $NO_x$ , tlenku węgla  $CO$  i dwutlenku węgla  $CO_2$  występuje przy współczynniku wzmocnienia  $K_p=0.00025$ . Współczynnik wzmocnienia  $K_p=0.0003$  zapewniała bardzo dobre własności dynamiczne silnika przy nie zwiększonych stężeniach związków toksycznych w spalinach.

**Słowa kluczowe:** silnik spalinowy, regulator elektroniczny, spaliny

## 1. Wprowadzenie

Układy elektronicznego sterowania silnikami są obecnie powszechnie stosowane w tłokowych silnikach spalinowych. Regulatory elektroniczne w znacznym stopniu ułatwiają spełnienie wzrastających wymagań ekologicznych i utrzymanie pełnej sprawności silników przez ich diagnozowanie podczas pracy. Bardzo szybkie rozpowszechnianie elektronicznych układów regulacji silnika spalinowego następuje jednocześnie z rozwojem techniki mikroprocesorowej pozwalając na uwzględnianie coraz większej liczby sygnałów wejściowych, decydujących o prawidłowej pracy silnika [1,2,4].

W ostatnim czasie bardzo szeroko rozwijane są komputerowe systemy sterowania silników tzw. „Drive by wire control”, które umożliwiają dokładne dopasowanie dawkowania paliwa do warunków pracy silnika, a praca silnika w stanach przejściowych z takim regulatorem zależy w dużym stopniu od parametrów transmitancji układu regulacji. Jednocześnie z warunkami pracy silnika w stanach niustalonych (położeniem trajektorii punktu pracy silnika) związana jest emisja związków toksycznych przez silnik gdyż rozkład tych związków w polu pracy silnika jest zróżnicowany. Dlatego dobierając optymalne parametry układu sterowania silnikiem powinno się uwzględniać również ekologiczne skutki sterowania silnikiem za pomocą regulatora elektronicznego [9,10].

## 2. Cel i zakres pracy

Celem prezentowanej pracy była ocena emisji związków toksycznych i ekonomiczności pracy silnika z regulatorem elektronicznym w niustalonych stanach pracy silnika. Badania wpływu parametrów regulatora na emisję związków toksycznych i ekonomiczność pracy silnika w niustalonych stanach pracy przeprowadzono na dynamometrycznym stanowisku badawczym. Odtwarzano charakterystyczne przebiegi obciążenia silnika, zmierzone podczas badań eksploatacyjnych pojazdu gaśnicowego z elektronicznym układem sterowania. Mierzono w sposób ciągły moment obrotowy silnika, godzinowe zużycia paliwa oraz udziały poszczególnych składników spalin: tlenku węgla, tlenków azotu, węglowodorów oraz dwutlenku węgla.

Analizę wpływu parametrów funkcji sterowania na zmianę emisji toksycznych składników spalin przeprowadzono przy uwzględnieniu jedynie współczynnika wzmocnienia  $K_p$ . Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że jest to współczynnik w największym stopniu wpływający na przebieg odpowiedzi obiektu sterowania, jakim jest silnik, na impuls jednostkowy prędkości obrotowej [6]. Do badań przyjęto średnią wartość tego współczynnika na poziomie 0.0003 oraz 0.00025 i 0.00035.

## 3. Metodyka i wyniki badań

Ponieważ pomiary chwilowej wartości toksycznych składników spalin są bardzo trudnym przedsięwzięciem technicznym, dlatego postanowiono eksperymentalnie zweryfikować metodykę

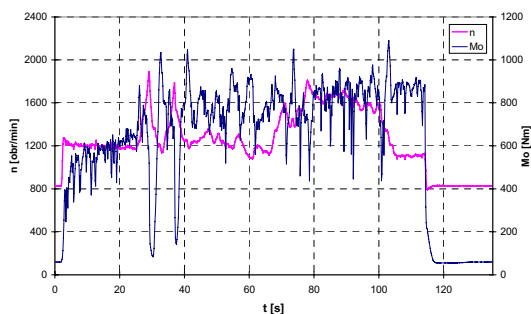
odtworzenia na hamowni cykli obciążenia silnika zgodnych z warunkami jego pracy w pojeździe, a na podstawie przebiegów chwilowych udziałów poszczególnych związków w spalinach oceniać średnie udziały toksycznych składników w spalinach wyznaczone w odniesieniu do całego cyklu pracy silnika (około 2 minut).

Do odtworzenia warunków pracy silnika, w pojeździe wykorzystano sygnał położenia pedału przyspieszenia P i prędkości obrotowej n. Sygnał chwilowego położenia pedału przyspieszenia P, czyli zadanej przez kierowcę prędkości obrotowej, był podawany do układu sterowania pompy wtryskowej. Jednocześnie na złącze zdalnego sterowania w sterowniku hamulca ustawionego w tryb pracy  $n = \text{const}$  podawany był drugi sygnał, proporcjonalny do zmierzonej prędkości obrotowej. Jeżeli na skutek zmiany dawki paliwa silnik rozwijał prędkość różniącą się od zmierzonej w pojeździe, wtedy wewnętrzny układ automatycznej regulacji sterownia hamulca zmieniał moment hamujący. Gdy prędkość silnika była za duża wtedy moment był zwiększany aż do osiągnięcia prędkości zmierzonej w pojeździe. Przy prędkości zbyt małej następowało zmniejszenie momentu obciążenia silnika.

Odtwarzanie warunków pracy silnika rozpoczynano po jego wcześniejszym nagraniu do temperatury  $80^{\circ}\text{C}$ , a więc po ustabilizowaniu się jego stanu cieplnego. Każdy kilkuminutowy cykl pracy pojazdu, realizowany był czterokrotnie, po czym wyznaczano średnią emisję składników toksycznych i zużycia paliwa dla poszczególnych cykli pracy oraz oceniano niepowtarzalność emisji między poszczególnymi cyklami pracy silnika.

### 3.1.1. Jazda ze stałą prędkością

Podczas jazdy ze stałą prędkością (28...30 km/h) następowała dwukrotna zmiana przełożenia skrzyni biegów w 30 i 38 sekundzie oraz redukcja w 85 sekundzie i dalej jazda przy zwiększonej prędkości obrotowej silnika, co spowodowało wzrost momentu obrotowego średnio o około 100 Nm.



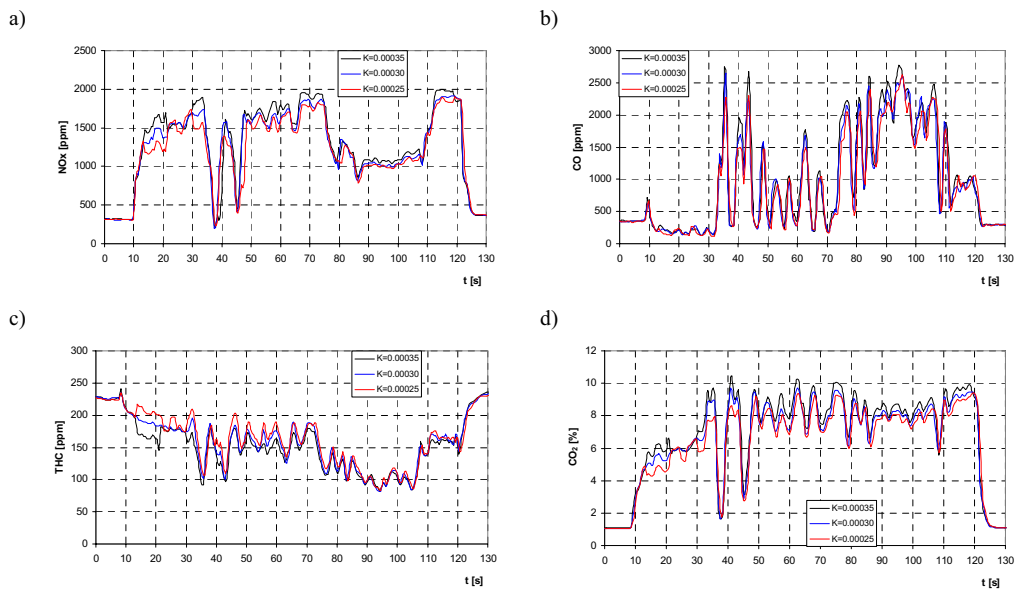
Rys. 1. Przebiegi wyznaczone podczas jazdy ze stałą prędkością - prędkość obrotowa - moment obrotowy  
Fig. 1. Runs appointed during drive with steady speed - an engine speed - torque

Przebiegi momentu obrotowego (rys. 1) charakteryzowały się dużą częstością zmian o dość dużej częstotliwości, a w niektórych zakresach zarejestrowany moment przekraczał moment maksymalny silnika o ok. 5-8 %. Spowodowane było to właściwościami hamulca wodnego DHP-3, jego układem sterowania oraz drganiami obudowy hamulca przenoszącymi się na czujnik siły, który umieszczony był pomiędzy podstawą hamulca a obudową wirnika.

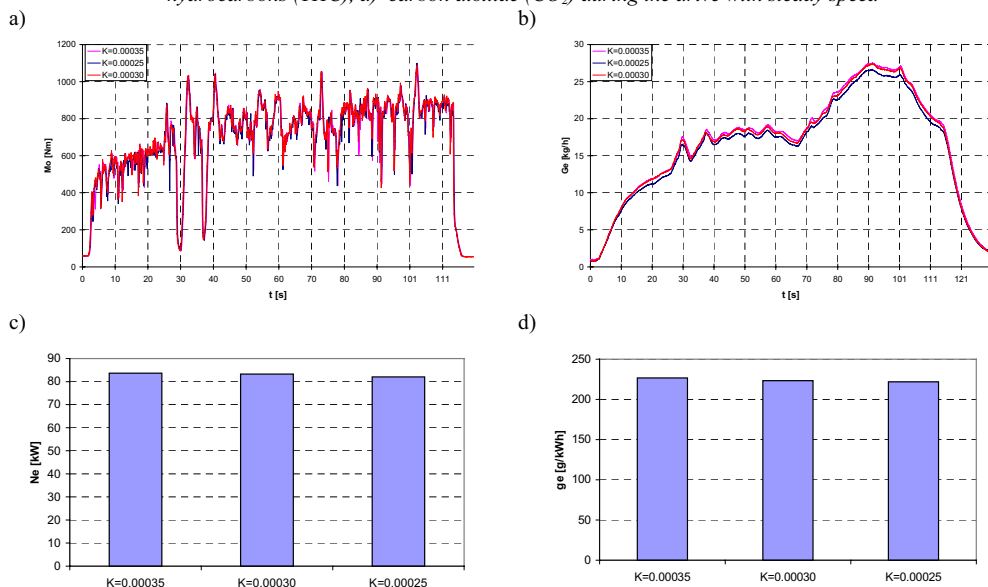
Na podstawie zarejestrowanych udziałów emisji czterech podstawowych składników spalin w funkcji czasu trwania cyklu pracy silnika, obliczono średnią emisję każdego ze składników dla całego cyklu pracy silnika bez uwzględniania biegu jałowego (rys. 3).

W stosunku do zmian prędkości obrotowej i momentu obrotowego silnika przebiegi składników spalin były przesunięte o około 5 sekund, co było spowodowane czasem niezbędnym do przepłynięcia spalin przez układ wylotu spalin, filtry oraz grzaną, ponad 10 – metrową drogę

gazową do analizatorów spalin. Wartości udziałów na początku i na końcu cyklu były porównywalne.



Rys. 2. Wpływ współczynnika wzmocnienia na udziały: a) tlenków azotu ( $NO_x$ ), b) tlenku węgla ( $CO$ ), c) węglowodorów ( $THC$ ), d) dwutlenku węgla ( $CO_2$ ) w czasie jazdy ze stałą prędkością  
 Fig. 2. Influence of strengthener coefficient on shares: a) nitrogen oxides ( $NO_x$ ), b) carbon monoxide ( $CO$ ), c) hydrocarbons ( $THC$ ), d) carbon dioxide ( $CO_2$ ) during the drive with steady speed

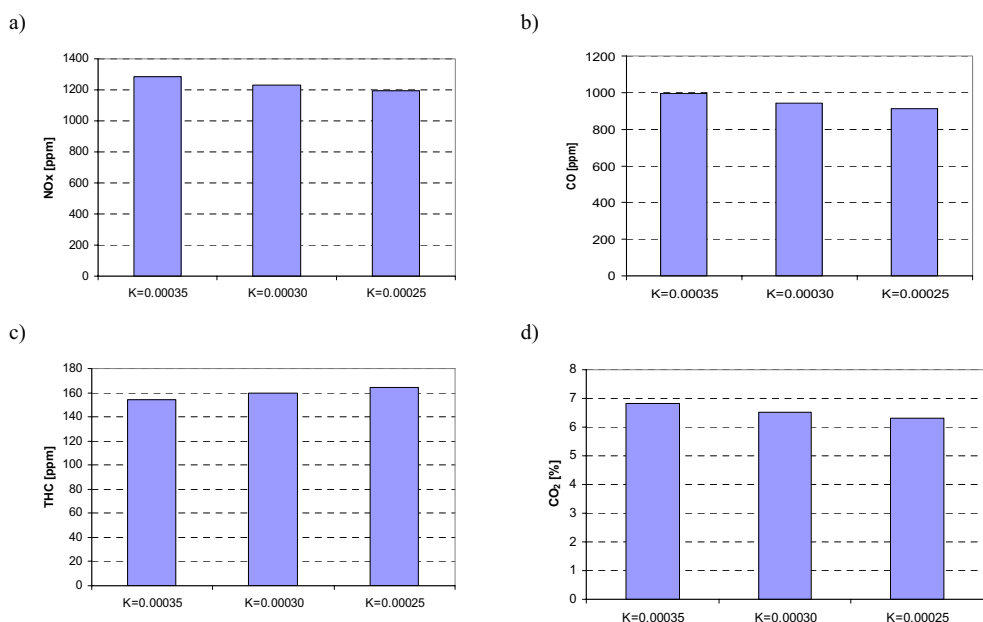


Rys. 3. Wpływ współczynnika wzmocnienia  $K_P$  na własności silnika podczas jazdy ze stałą prędkością: a) moment obrotowy, b) godzinowe zużycie paliwa, c) średnia moc użyteczna, d) średnie jednostkowe zużycie paliwa  
 Fig. 3. Influence of the strengthener coefficient  $K_P$  on property of engine during drive with steady speed: a) torque, b) fuel consumption, c) average power, d) specific fuel consumption

Zmiany udziałów składników spalin odpowiadały stanom pracy silnika. Małe były udziały CO, NO<sub>x</sub> i CO<sub>2</sub> podczas pracy silnika na biegu jałowym, a następnie zmieniały się stosownie do obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej (rys. 2).

Na wszystkich przebiegach widać zmiany spowodowane zmianą przełożenia w skrzyni biegów. Tlenki azotu rosły od 10 sekundy powyżej 1500 ppm a po redukcji biegu z IV na III po 65 sekundzie ulegały zmniejszeniu. Po 65 sekundzie wzrastały udziały CO, gdy silnik pracował ze zwiększoną prędkością obrotową, a jednocześnie w przedziale tym ulegały zmniejszeniu udziały węglowodorów. Stężenie CO<sub>2</sub> po rozpedzeniu pojazdu utrzymują się na poziomie ok. 8%, co odpowiadało w przybliżeniu stałej mocy silnika przy zbliżonej prędkości obrotowej.

Z przedstawionych na rysunku 4 wyników obliczeń średnich emisji z czterech przebiegów zarejestrowanych podczas czterech kolejnych przebiegów jazdy widoczna była duża powtarzalność wyników tych udziałów, co świadczyło o dużej powtarzalności odtwarzania i pomiarów udziałów składników spalin podczas poszczególnych cykli pracy silnika i dlatego zrezygnowano z analizy statystycznej podczas tych badań.



Rys. 4. Wpływ współczynnika wzmocnienia na średnie udziały składników spalin podczas odtwarzania cyklu jazdy ze stałą prędkością: a) tlenków azotu (NO<sub>x</sub>), b) tlenku węgla (CO), c) węglowodorów (THC), d) dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>)

Fig. 4. Influence of the strengthener coefficient on averages shares of exhaust gas components during drive cycle reproduction with steady speed: a) nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), b) oxide of carbon (CO), the c) the hydrocarbons (the THC), the d) the dioxide of carbon (CO<sub>2</sub>)

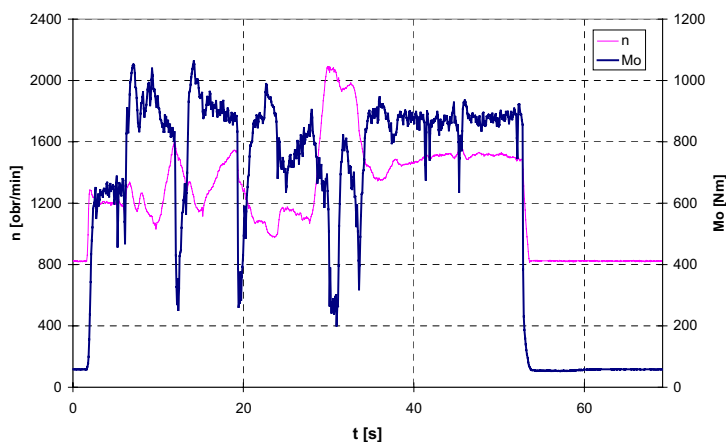
Analizując zmiany parametrów pracy silnika spowodowane zmianami współczynnika wzmocnienia stwierdzono niewielki 6% wzrost M<sub>0</sub> przy wzroście wartości współczynnika K<sub>p</sub> z 0.00025 do 0.00030 oraz 5% wzrost M<sub>0</sub> przy wzroście K<sub>p</sub> od wartości 0.00030 do 0.00035 (przy niemal nie zmienionej wartości godzinowego zużyciu paliwa). Zmiany średniego godzinowego zużycia paliwa były nieco mniejsze i wzrost współczynnika wzmocnienia z 0.00025 do 0.0003 spowodował ok. 3% wzrost godzinowego zużycia paliwa G<sub>e</sub>, natomiast dalsze zwiększenie tego współczynnika do 0.00035 nie spowodowało widocznego wzrostu zużycia paliwa. Przebiegi momentu obrotowego i godzinowego zużycia paliwa były niemalże identyczne (rys 3).

Na podstawie przebiegów udziałów składników spalin stwierdzono, że zmiana współczynnika wzmocnienia  $K_p$  powodowała zmianę udziałów składników spalin w granicach 5-10%, przy czym wzrost wartości współczynnika wzmocnienia spowodowało także wzrost udziałów większości badanych składników spalin (rys. 3 i 4). Jedynie stężenie węglowodorów wykazywało niewielką 5% tendencję spadkową. Różnice stężeń najwyraźniej były widoczne pomiędzy 10 a 35 sekundą cyklu.

### 3.2. Rozpędzanie pojazdu

Na przebiegach momentu obrotowego podczas rozpędzania pojazdu widoczna była podwójna zmiana biegów w 11 i 18 sekundzie oraz redukcja w 35 sekundzie (rys. 5). Zmianom tym odpowiadają zmiany godzinowego zużycia paliwa (rys. 6b).

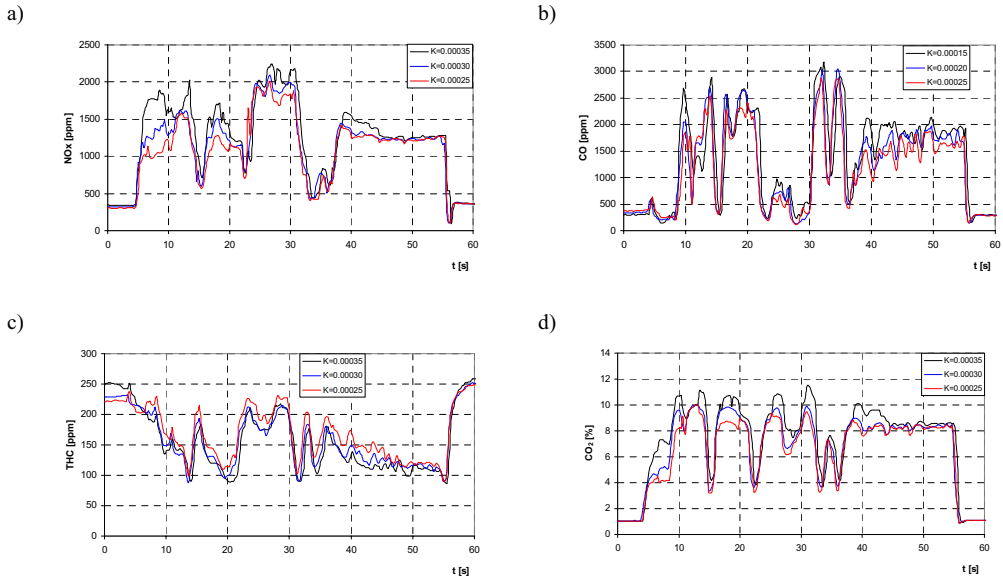
Średnie udziały węglowodorów i dwutlenku węgla są bardzo zbliżone do udziałów zmierzonych podczas jazdy ze stałą prędkością, natomiast o około 10 % mniejsze są udziały tlenków azotu przy jednoczesnym wzroście udziałów tlenku węgla o około 20 %. Świadczy to o mniejszym średnim obciążeniu silnika i większych udziałach jego pracy w zakresie małych obciążeń silnika.



Rys. 5. Przebiegi wyznaczone podczas rozpędzania: prędkość obrotowa – moment obrotowy  
Fig. 5. Runs appointed during accelerating: an engine speed - torque

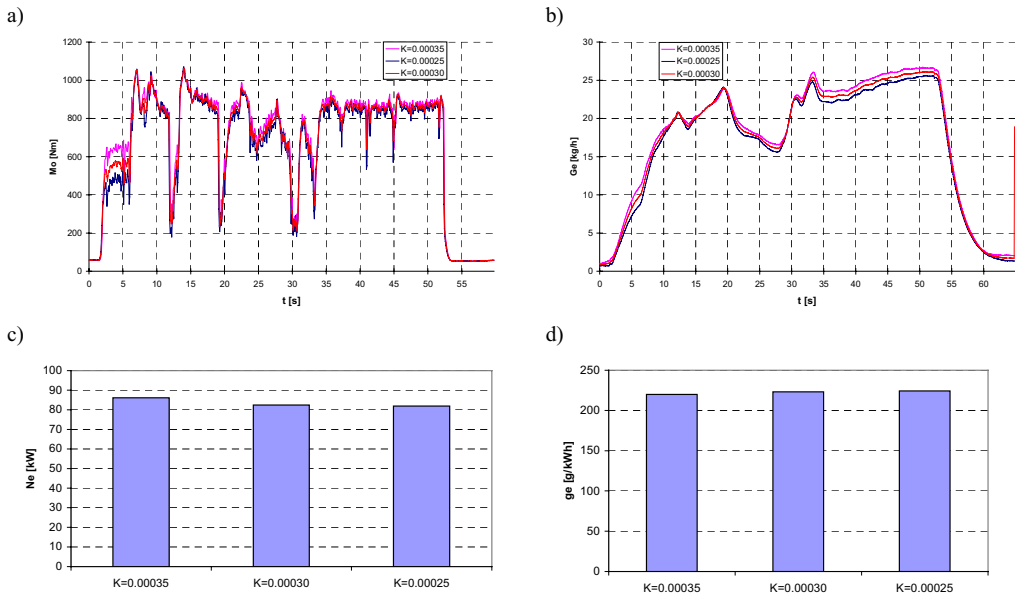
Największy średni moment obrotowy silnika uzyskano podczas rozpędzania pojazdu MTLB przy największej wartości współczynnika wzmocnienia  $K_p$ . Przy mniejszych jego wartościach moment obrotowy i moc zmniejszały się nieznacznie (rys. 7a). Podobne zmiany można było zaobserwować na wykresie jednostkowego zużycia paliwa, a najkorzystniejsza wartość średnia tego zużycia została uzyskana przy realizacji cyklu rozpędzania z największą wartością współczynnika wzmocnienia.

Udziały poszczególnych składników spalin rosły również przy większych wartościach współczynnika  $K_p$ . Zwłaszcza widoczne było to na przebiegu udziałów tlenków azotu  $\text{NO}_x$  gdzie różnice udziałów tego składnika spalin wynosiły nawet 9% (miedzy skrajnymi wartościami współczynnika wzmocnienia). Udziały  $\text{CO}$  i  $\text{CO}_2$  były także wyższe przy większych wartościach współczynnika  $K_p$ , a ich wzrost był porównywalny ze wzrostem  $\text{NO}_x$  (rys. 6d). Udziały węglowodorów podobnie jak podczas jazdy ze stałą prędkością zmniejszały się wraz ze wzrostem  $K_p$ . Różnice udziałów pomiędzy cyklami rozpędzania przy różnych wartościach współczynnika wzmocnienia sięgały 5...6%.



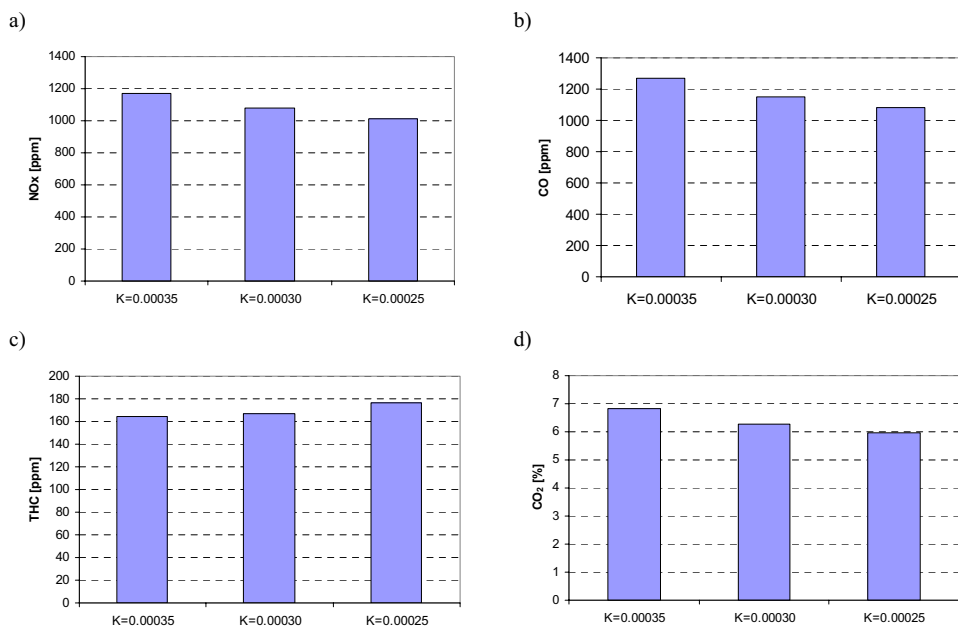
Rys. 6. Wpływ współczynnika wzmacnienia na udziały tlenków azotu ( $NO_x$ ), tlenku węgla (CO), węglowodorów (THC) i dwutlenku węgla ( $CO_2$ ) w czasie przyspieszania

Fig. 6. Influence of strengthener coefficient on shares of nitrogen oxides ( $NO_x$ ), carbon monoxide (CO), hydrocarbons (THC) and carbon dioxide ( $CO_2$ ) during accelerating



Rys. 7. Wpływ współczynnika wzmacnienia  $K_P$  na moment obrotowy i zużycie paliwa podczas rozpędzania pojazdu: a) moment obrotowy, b) godzinowe zużycie paliwa, c) średnia moc użyteczna, d) średnie jednostkowe zużycie paliwa

Fig. 7. Influence of strengthener coefficient  $K_P$  on torque and fuel consumption during accelerating the vehicle: a) torque, b) hourly fuel consumption, c) average power, d) average specific fuel consumption



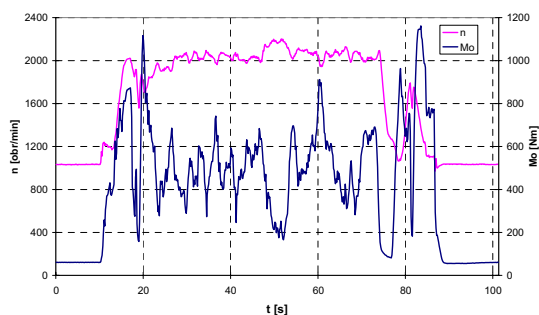
Rys. 8. Wpływ współczynnika wzmocnienia na średnie udziały poszczególnych składników spalin podczas odzwierciedlenia cyklu przyspieszania a) tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ), b) tlenku węgla (CO), c) węglowodorów (THC), d) dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) w czasie cyklu pracy silnika

Fig. 8. Influence of strengthener coefficient on averages shares of exhaust gas components during the repeating of accelerating cycles: a) nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ), b) carbon monoxide (CO), c) hydrocarbons (THC), d) carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) during realisation of engine work cycle

### 3.3. Jazda terenowa

Na przebiegu momentu obrotowego silnika między 20 do 80 sekundą jazdy terenowej widoczne były jego zmiany w zakresie od 200 do 800 Nm, co było wynikiem zmian profilu pokonywanego terenu (wzniesienia i doły) oraz włączaniem mechanizmów skrzętu związanym ze zmianą kierunku ruchu pojazdu.

Z rysunku 9 widać, że przez znaczny czas pracy obciążenie silnika było dość duże (pomiędzy 400 a 600 Nm), a chwilowe wartości momentu obrotowego zbliżały się do momentu maksymalnego.



Rys. 9. Przebiegi uzyskane przy odtworzeniu jazdy terenowej: prędkość obrotowa – moment obrotowy  
Fig. 9. Runs appointed during repeating exploitative drives: an engine speed - torque

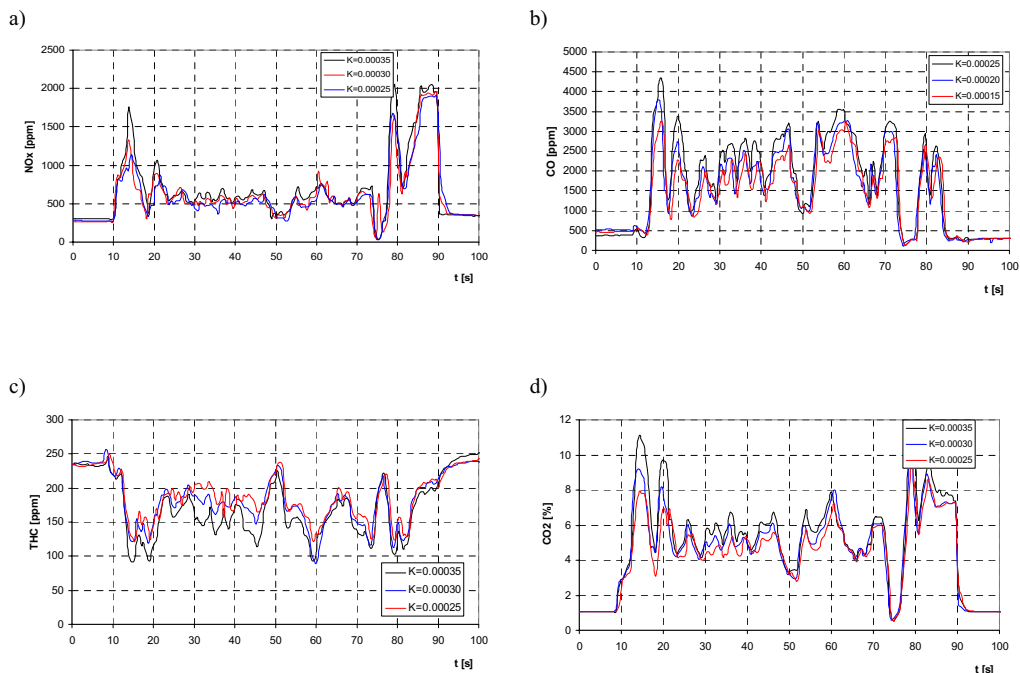


W zasadzie, przebiegi udziałów poszczególnych składników w spalinach były porównywalne, a ich charakter zmian był niemalże identyczny. Tylko w niektórych przedziałach czasowych widoczne były różnice między poszczególnymi przebiegami

Bardziej istotne tendencje zmian stężeń poszczególnych składników spalin, widoczne były na wykresach prezentujących wyniki pomiarów uśrednionych za cały cykl badawczy. Zmniejszenie współczynnika wzmocnienia  $K_p$  od 0.00035 do 0.00025, a tym samym zmniejszenie dynamiki zmian stanów pracy silnika powodowało mniejsze udziały:

- tlenków azotu o około 6-10%,
- tlenku węgla o ok. 7-10%,
- dwutlenku węgla 5-10%.

przy jednoczesnym wzroście udziałów węglowodorów o ok. 6-10%.

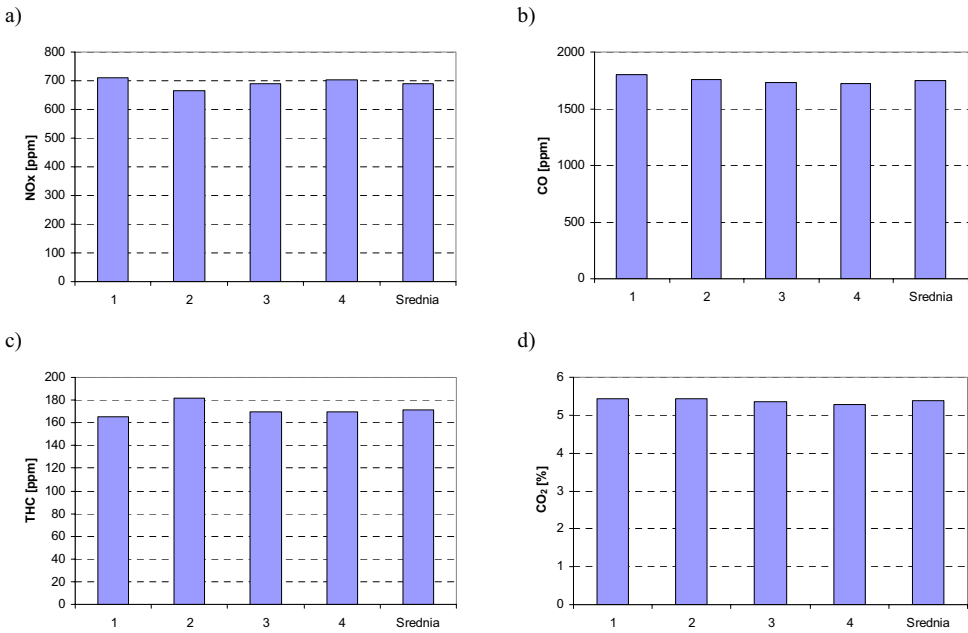


Rys. 10. Przebiegi stężeń toksycznych składników spalin podczas jazdy ze stałą prędkością: a) tlenki azotu, b) tlenek węgla, c) węglowodory, d) dwutlenek węgla przy różnych wartościach współczynnika wzmocnienia  $K_p$

Fig. 10. Concentrations of exhaust gas toxic components during drive with steady speed: a) nitrogen oxides (NOx), b) carbon monoxide (CO), c) hydrocarbons (THC), d) carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) with different values of the strengthener coefficient  $K_p$

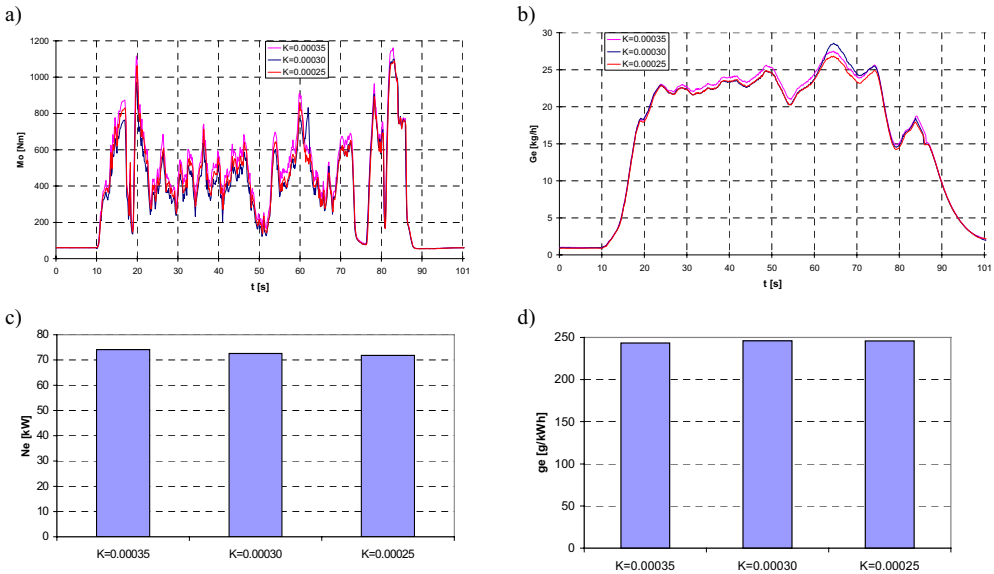
Tendencje te nie zależą od warunków pracy silnika odtwarzanych na stanowisku badawczym zrealizowanych przebiegów aczkolwiek widoczne są niewielkie różnice między poszczególnymi odtwarzanymi warunkami pracy silnika.

Ogólnie można stwierdzić, że zmniejszenie współczynnika wzmocnienia powoduje realizację cyklu pracy silnika z nieco mniejszym zużyciem paliwa, czego efektem są mniejsze udziały dwutlenku węgla oraz mniejsza emisja toksycznych składników spalin. Jednakże pociąga to za sobą pogorszenie dynamiki jazdy.



Rys. 11. Średnie udziały poszczególnych składników spalin otrzymane z czterech kolejnych realizacji cyklu jazdy terenowej a) tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ), b) tlenku węgla (CO), c) węglowodorów (THC), d) dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) w czasie cyklu pracy silnika

Fig. 11. Averages shares of exhaust gas components stored during four next realizations of exploitative drive work cycle: a) nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ), b) carbon monoxide (CO), c) hydrocarbons (THC), d) carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ )



Rys. 12. Wpływ współczynnika wzmocnienia  $K_p$  na własności dynamiczne i ekonomiczne silnika podczas jazdy terenowej pojazdu: a) moment obrotowy, b) godzinowe zużycie paliwa, c) średnia moc użyteczna, d) średnie jednostkowe zużycie paliwa

Fig. 12. Influence of strengthener coefficient  $K_p$  on dynamic and economical properties of the engine during exploitative drive of vehicle: a) torque, b) fuel consumption, c) average power, d) average specific fuel consumption

Jazda terenowa pojazdu MTLB cechowała się stosunkowo najmniejszym zróżnicowaniem własności dynamicznych silnika podczas realizacji tego cyklu przy różnych wartościach współczynnika wzmocnienia  $K_p$ . Niewielkie różnice występowały pomiędzy przebiegami momentu obrotowego i godzinowego zużycia paliwa (rys. 12a i b) oraz pomiędzy średnimi wartościami mocy i jednostkowego zużycia paliwa (rys. 12c i d) w granicach ok. 2% dla mocy i 1% dla jednostkowego zużycia paliwa. Świadczy to o tym, że ze względu na średnią moc silnika korzystniejsza była jego praca przy największej wartości współczynnika  $K_p$ .

Duże różnice utrzymywały się pomiędzy stężeniami związków toksycznych w spalinach, co było może mniej widoczne na przebiegach stężeń poszczególnych składników w funkcji czasu (rys. 10). Zjawisko to można zaobserwować na wykresach średnich wartości stężeń składników spalin (rys. 11). Podobnie jak w poprzednich cyklach jazdy ze stałą prędkością oraz rozpędzania pojazdu największe stężenia  $\text{NO}_x$ , CO i  $\text{CO}_2$  były obserwowane podczas eksploatacji silnika z największą wartością współczynnika wzmocnienia  $K_p$ , związanego z najlepszymi własnościami dynamicznymi silnika, natomiast największe stężenia węglowodorów występowały przy najmniejszej wartości współczynnika wzmocnienia  $K_p$ .

#### **4. Podsumowanie**

1. Próby odtwarzania na hamowni eksploatacyjnych warunków pracy pojazdu MTLB umożliwiły dokonanie oceny własności silnika pracującego w stanach nieustalonych ze szczególnym uwzględnieniem własności ekonomicznych oraz emisji toksycznych składników spalin, których pomiar w warunkach eksploatacyjnych był niemożliwy do przeprowadzenia. Możliwe było przeprowadzenie porównania wpływu różnych rodzajów cykli obciążenia na własności dynamiczne i ekonomiczne pracy silnika oraz skład spalin.
2. Wykonane badania potwierdziły zależności między parametrami regulacji a emisją toksycznych składników spalin i czynnik ten powinien być uwzględniany przy doborze parametrów funkcji sterowania. Zmniejszenie współczynnika wzmocnienia korzystnie wpływa na emisji toksycznych składników spalin, powoduje jednak zmniejszenie zużycia paliwa, a osiągnięcie kolejnych stanów jest wolniejsze. Dlatego ostateczna decyzja o wartości współczynnika powinna być efektem kompromisu między zużyciem paliwa przez silnik, wynikającym z jego zastosowania, a oddziaływaniem silnika na środowisko.
3. W wyniku przeprowadzenia powtórzeń cykli roboczych silnika przy różnych parametrach układu regulacji oceniono, że najkorzystniejszym ze względów dynamicznych i ekonomicznych pracy silnika jest współczynnik wzmocnienia  $K_p=0.00035$ , natomiast najmniejsze stężenie tlenków azotu  $\text{NO}_x$ , tlenku węgla CO i dwutlenku węgla  $\text{CO}_2$  występuje przy współczynniku wzmocnienia  $K_p=0.00025$ . Można stąd wysnuć wniosek, że środkowa wartość współczynnika wzmocnienia  $K_p=0.0003$  zapewniała bardzo dobre własności dynamiczne silnika (różnica mocy maksymalnej i momentu obrotowego wynosi ok. 5%) przy nie zwiększonych stężeniach związków toksycznych w spalinach (różnica stężeń składników gazowych wynosi ok. 2..3%).

#### **Literatura**

- [1] Hikosaka, N., *A view of the Future of Automotive Diesel Engines*, SAE 972682.
- [2] Dorna, G., Klaus, R., Polaszek A., *System sterowania silnikiem SW-400 z mikrokontrolerem 80C535*, III Symp. Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 96. Poznań 1996.
- [3] Kaczorek, T., *Teoria układów regulacji automatycznej*, WNT, Warszawa 1974.
- [4] Karczewski, M., Świątek S., Walentynowicz J.: *Wstępny dobór parametrów elektronicznego regulatora pompy wtryskowej silnika o zaplonie samoczynnym*, Biuletyn WAT XLVII, nr 6, 1998.

- [5] Karczewski, M., Walentynowicz, J., *Dobór parametrów regulacji silnikiem o zapłonie samoczynnym*, IV Sympozjum Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 99. Poznań 1999.
- [6] Karczewski, M., *Sterowanie silnikiem o zapłonie samoczynnym za pomocą regulatora elektronicznego*, Rozprawa doktorska, WAT Warszawa 2005.
- [7] Klaus, R., *Synteza wybranych algorytmów zabezpieczeń i sterowania silnikiem wysokoprężnym*, III Sympozjum Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 96. Poznań 1996.
- [8] Krutow, W., *Automatyczna regulacja silników spalinowych*, PWT, Warszawa 1960.
- [9] Ochocki, W., *Automatyzacja silnika SW 400*, II Sympozjum Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 94. Poznań 1994.
- [10] Ochocki, W., *Numerycznie sterowane systemy wtrysku paliwa silników wysokoprężnych*, PTPN Poznań 1994.