

## PRELIMINARY RESEARCH OF THE ADAPTIVE CONTROL OF THE INJECTION TIMING IN THE DIESEL ENGINE

Jacek Poleszak

Lublin University of Technology  
Ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland  
tel.: +48 81 5381259, fax: +48 81 5381258  
e-mail: jpoleszak@wp.pl

### Abstract

The basic aim in controlling the diesel engine is to obtain a maximal effective moment for given fuel dose with keeping of a minimum amount of toxic exhaust compounds. This postulate can be realized by matching the appropriate fuel injection commencement timing. In this paper the research of the control system is presented, which allows the constant matching of the injection advance in the CI engine to varying characteristics of the controlled object, that is the engine. Quality factor of working process which is defined as a effective engine torque, is estimated on the bases of the instantaneous crankshaft torsion measurement. This concept, unlike the current system, suggest the use of efficient torque ( $M_e$ ) measurement to generate control quantities, which control the work process of an engine. Realization of such measurements leads to treatment of the control system as an extremal control unit (possibility of maximizing quantitative parameters) as well as an adaptive control system (possibility of unit's reaction on changes of the parameters which influence the work process of an engine).

**Keywords:** transport, combustion engines, adaptive control, injection timing, crankshaft torsion

## WSTĘPNE BADANIA ADAPTACYJNEGO STEROWANIA KĄTEM WYPRZEDZENIA WTRYSKU W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

### Streszczenie

Podstawową funkcją celu w sterowaniu wysokoprężnym silnikiem spalinowym jest osiągnięcie maksymalnego momentu użytecznego dla zadanej dawki paliwa z zachowaniem odpowiednio niskiego poziomu toksyczności spalin. Postulat ten zrealizować można dobierając odpowiednią chwilę podania dawki paliwa definiowaną jako kąt wyprzedzenia wtrysku. W artykule przedstawiono wstępne badania układu sterowania, pozwalającego na ciągle dopasowywanie się kąta wyprzedzenia wtrysku w silniku ZS do zmieniających się charakterystyk obiektu sterowania, jakim jest silnik. Wskaźnik jakości procesu roboczego zdefiniowany jako moment użyteczny silnika, szacowany jest w oparciu o pomiar chwilowego kąta skręcenia wału korbowego silnika. W proponowanym systemie sterowania, w odróżnieniu od istniejących obecnie systemów, planuje się wykorzystanie pomiaru momentu użytecznego silnika  $M_e$  do generowania wartości wielkości sterujących przebiegiem procesu roboczego silnika spalinowego. Realizacja takiego pomiaru prowadzi z jednej strony do potraktowania układu sterowania jako układu ekstremalnego (maksymalizacja wskaźników jakości procesu roboczego), natomiast z drugiej strony jako układu sterowania adaptacyjnego (możliwość reakcji układu sterowania na duże zmiany parametrów decydujących o przebiegu procesu roboczego).

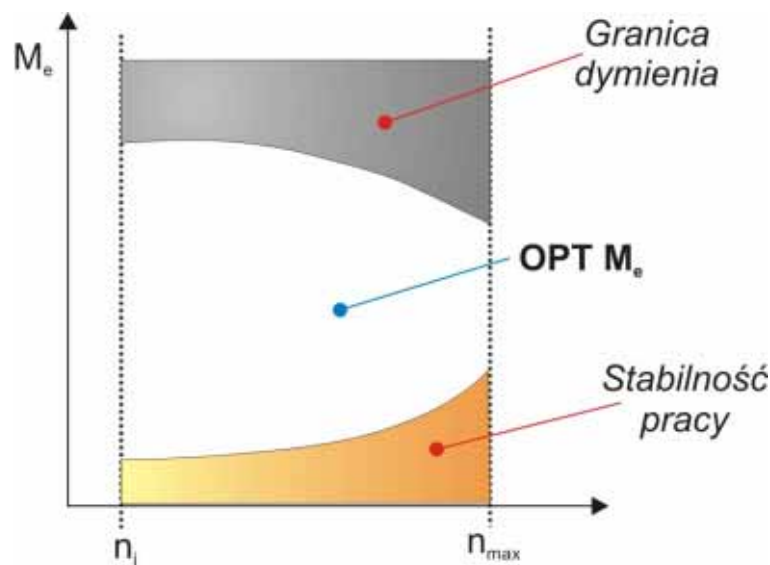
**Słowa kluczowe:** transport, silniki spalinowe, adaptacyjne sterowanie, kąt wtrysku, skręcenie wału korbowego

### 1. Wstęp

Prace badawcze poświęcone aktywnej kontroli sterowania procesami spalania w silnikach tłokowych są nadal w fazie rozwoju, jednak już teraz można stwierdzić, że jest to aktualny

kierunek naukowego rozwoju badań nad tłokowym silnikiem spalinowym. Głównym celem tych badań jest opracowanie metod pomiaru wskaźnika jakości oraz algorytmów sterujących procesem spalania w czasie rzeczywistym [1, 5, 9, 13].

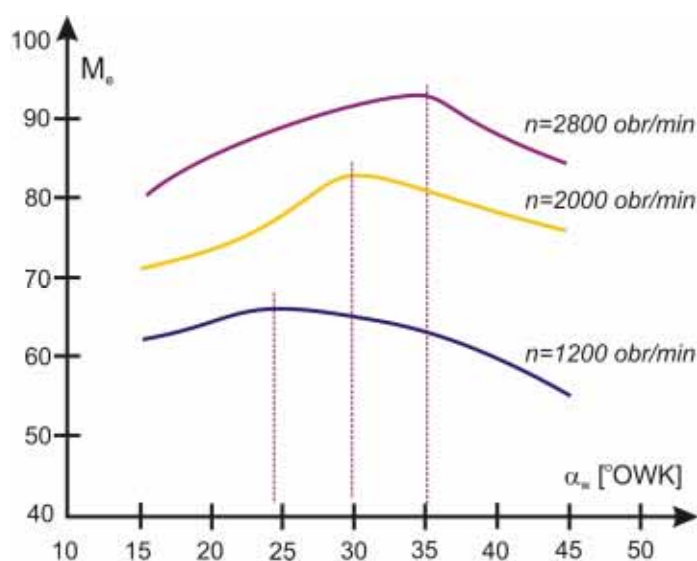
Funkcją celu aktywnego sterowania spalaniem w silniku ZS jest uzyskanie maksymalnych osiągnięć silnika przy zachowaniu dopuszczalnego poziomu toksyczności spalin i minimalnego zużycia paliwa. Jednym z problemów stojących przed rozwiązaniem procesu sterowania silnikiem spalinowym o zapłonie samoczynnym jest problem odpowiedniego sterowania kątem wyprzedzenia wtrysku w celu uzyskania maksymalnego efektywnego momentu obrotowego.



Rys.1. Obszar poszukiwania optymalnego momentu efektywnego w silniku o zapłonie samoczynnym z uwzględnieniem istniejących ograniczeń

Fig. 1. Area of optimal effective torque search in compression ignition engine considering existing limitations

O efektach procesu spalania decyduje chwila wtrysnięcia dawki paliwa. Wielkość dawki paliwa jest związana automatycznie z obciążeniem silnika (z potrzebami operatora czy też kierowcy) i możliwość jej zmiany jest ograniczona jedynie poziomem dymienia (lub minimalną wartością współczynnika powietrza) [2, 11, 12].



Rys.2. Zależność momentu efektywnego  $M_e$  od wartości kąta wyprzedzenia wtrysku  $\alpha_w$  dla różnych prędkości obrotowych silnika ISUZU Y17DT

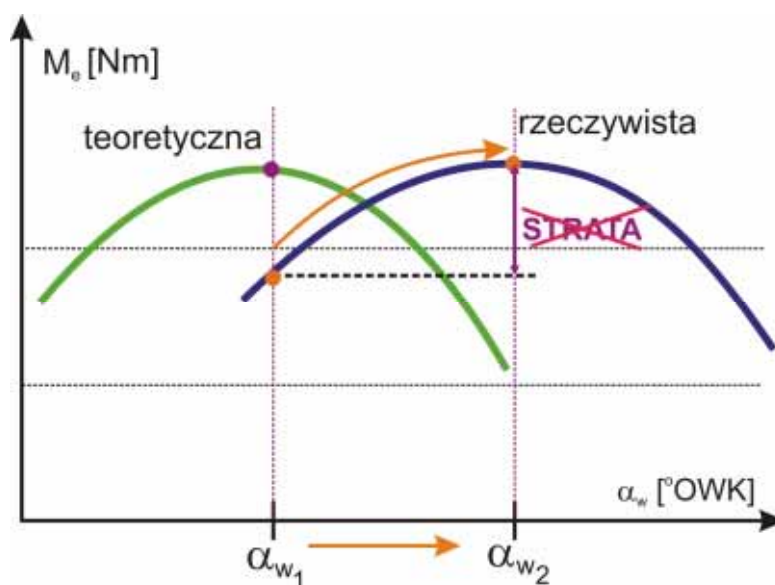
Fig. 2. Dependence of the engine effective torque on injection advance for variable rotational speeds

Podczas prowadzonych prac badawczych przez autora [6, 7], kąt wyprzedzenia wtrysku w silniku o zapłonie sterującym, został przyjęty jako główny parametr sterujący mający wpływ na proces spalania i jego parametry.

## 2. Adaptacyjne sterowanie kątem wyprzedzenia wtrysku w silniku ZS

Dla danych warunków pracy silnika istnieje optymalna wartość kąta wyprzedzenia wtrysku, dla której moc silnika osiąga wartość maksymalną. Realizowana wartość kąta wyprzedzenia wtrysku jest jednak kompromisem pomiędzy maksymalną mocą silnika a zużyciem paliwa i poziomem zadymienia spalin.

Każda zmiana (zmniejszenie lub zwiększenie) kąta wyprzedzenia wtrysku w stosunku do wartości optymalnej powoduje spadek mocy silnika. Jednocześnie powoduje to zmiany w poziomie jednostkowego zużycia paliwa i toksyczności spalin.



Rys.3. Idea dobierania wartości kąta wyprzedzenia wtrysku w algorytmie adaptacyjnym  
 Fig. 3. Idea of adaptive algorithm for optimal injection advance search

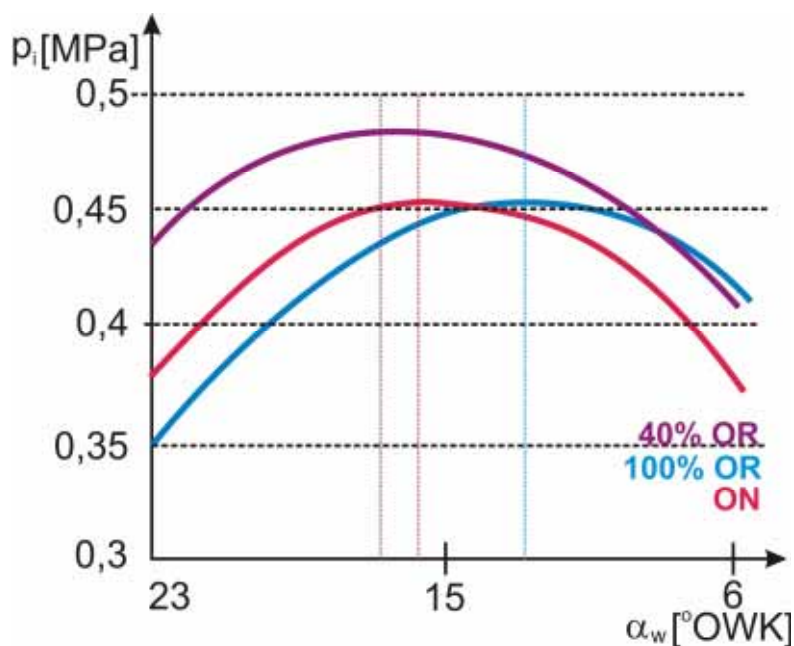
Mechaniczne układy wtryskowe nie zapewniały możliwości dostosowywania kąta wtrysku do zmian charakterystyki silnika, dopiero od niedawna zastosowane elektroniczne sterowanie układami zasilania silników ZS pozwala na zastosowanie metod sterowania adaptacyjnego w którym jedna z podstawowych wielkości, dobieranych przez algorytm sterujący do aktualnych warunków pracy silnika wysokoprężnego, jest kąt wyprzedzenia wtrysku.

## 3. Przyczyny zmienności w czasie charakterystyk silnika wysokoprężnego

Celem prowadzonych badań autora jest wprowadzenie mechanizmu adaptacji do algorytmu sterowania wtryskiem oleju napędowego w silniku wysokoprężnym. Mówiąc o funkcji adaptacji autor rozumie dopasowanie się parametrów układu sterowania do zmienności obiektu, jakim jest silnik spalinowy.

Zmiana charakterystyk spowodowana jest kilkoma przyczynami. Przede wszystkim starzeniem się silnika i zmianą jego stanu technicznego. Wpływ na warunki pracy silnika mają też środki smarne i eksploatacyjne, zwłaszcza paliwo. Wpływ na zmianę charakterystyk silnika mają również parametry niemierzone w pokładowych systemach sterowania, do których możemy zaliczyć

wilgotność powietrza i bezpośrednio oddziaływanie promieni słonecznych powodujące nagrzewanie się pojazdu i elementów silnika.



Rys. 4. Wpływ kąta wyprzedzenia wtrysku  $\alpha_w$  na ciśnienie indykowane  $p_i$  w zależności od zastosowanego paliwa [4]  
Fig. 4. Influence of injection advance on mean indicated pressure depending on used fuel

Zmienność obiektu jest również wynikiem statystycznego rozrzutu pomiędzy egzemplarzami silnika (podczas produkcji przyjęte tolerancje wykonawcze różnicowanie kolejnych egzemplarzy silnika). Algorytm sterowania jest algorytmem tworzonym zwykle na podstawie wyników badań kilkudziesięciu (np. 30) egzemplarzy. Teoretycznie każdy z egzemplarzy powinien mieć własne wartości parametrów sterowania.

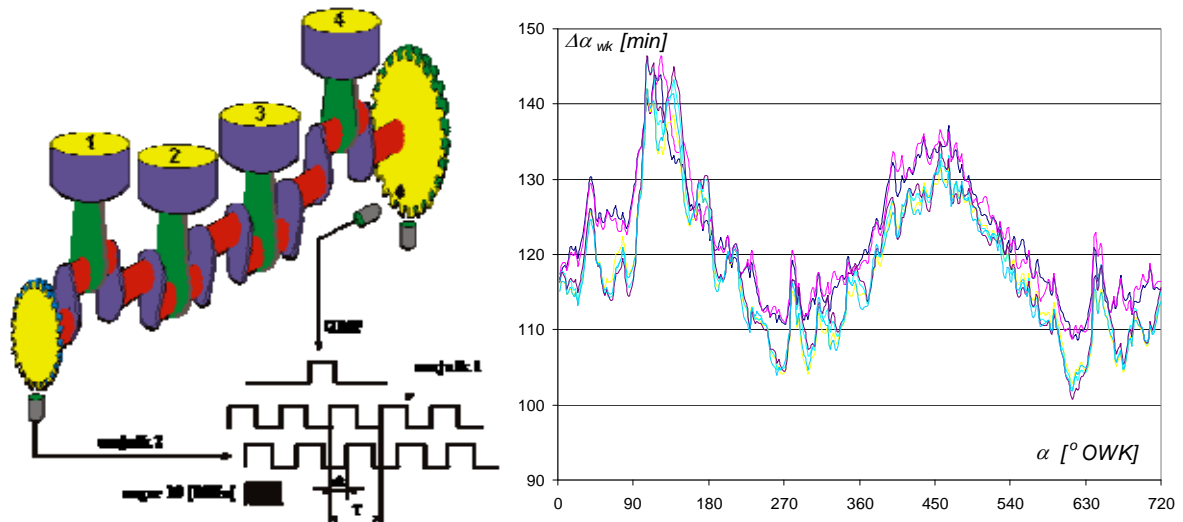
Zmiany charakterystyki obiektu oraz warunków jego użytkowania powodują, że uzyskanie maksymalnego wskaźnika jakości procesu roboczego nie jest możliwe bez użycia mechanizmów samouczących się. Jakość pracy silnika spalinowego definiowana jest poprzez zużycie paliwa, maksymalne osiągi silnika oraz poziom toksycznych składników spalin. W literaturze naukowej spotyka się metody bazujące na szacowaniu takich osiągnięć w oparciu o warunki pracy silnika w połączeniu ze sterowaniem adaptacyjnym lecz dotychczas prowadzone badania dotyczyły silników z zapłonem iskrowym [14, 15], lub też dotyczyły problemów diagnostycznych [8, 9, 16].

Duża stopa niestacjonarności charakterystyk silnikowych stwarza trudności w odpowiednio szybkiej estymacji aktualnych parametrów modelu silnika zdefiniowanego w sterowniku. Wyniki działania algorytmów adaptacyjnych mogą być stosowane do badania, czy zaszły istotne zmiany obiektu a tym samym pozwalają na ciągłą optymalizację procesu spalania.

#### 4. Idea adaptacji kąta wyprzedzenia wtrysku

Myślą przewodnią autora niniejszego artykułu jest przekonanie, że szacowanie momentu obrotowego może być dokonane na podstawie pomiaru kąta skręcenia wału korbowego. Pomiar taki jest tani i łatwo dostępny w warunkach silnika zamontowanego na stanowisku badawczym lub w pojeździe. System ten składa się z dwóch czujników reluktancyjnych określających czasy pomiędzy kolejnymi położeniami zębów kół zębatych umieszczonych po przeciwległych stronach wału korbowego. Pierwsze koło jest wieńcem koła zamachowego drugie natomiast umieszczone

po przeciwnej stronie wału, jest mniejsze, lecz wyposażone w taką samą liczbę zębów jak pierwsze. Metoda pomiaru została zaprezentowana już wiele lat temu [9, 10, 13, 15].



Rys. 5. Schemat układu pomiaru kąta skrzywienia wału korbowego (widoczne czujniki reluktancyjne, koło zamachowe i koło zębate zamocowane w przedniej części wału). Po prawej stronie, przebieg średnich wartości kąta skrzywienia wału silnika ISUZU Y17DT dla różnych prędkości obrotowych

Fig. 5. Crankshaft torsion measurement system diagram (inductive sensors, flywheel and front sensor toothed wheel presented). On the right: Mean values of crankshaft torsion of ISUZU Y17DT engine for variable rotational speed

Połączenie metody pomiaru kąta skrzywienia wału korbowego silnika i metody adaptacyjnego dopasowywania kąta wyprzedzenia wtrysku pozwoli na nieustanne dobieranie kąta wyprzedzenia wtrysku do wartości gwarantującej uzyskanie optymalnego momentu obrotowego.



Fot. 1. Czujniki reluktancyjne współpracujące z kołami zębatymi na przeciwległych końcach wału korbowego oraz moduł pomiarowy DTS 700 przetwarzający sygnał

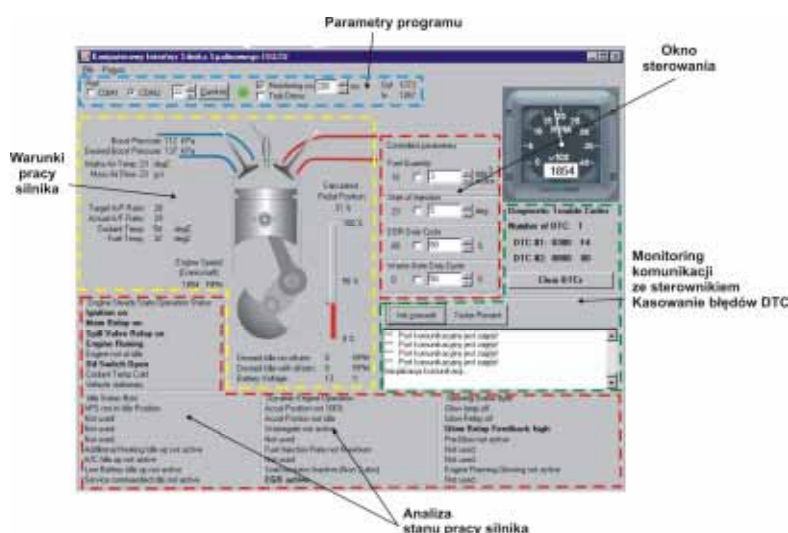
Phot. 1. Reluctance sensors and toothed wheels mounted at opposite sides of the crankshaft and DTS 700 data acquisition module

Niestety, maksymalna wartość wskaźnika jakości wynikająca dla momentu użytecznego silnika spalinowego nie jest jeszcze ostateczną miarą prawidłowości procesu spalania. Należy zbudować wskaźnik jakości uwzględniający również toksyczność spalin, oraz zużycie paliwa. Albowiem z reguły zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku mają istotny wpływ na toksyczność spalin.

Tak przyjęty wskaźnik jakości będzie poddany optymalizacji wielokryterialnej, przy czym czynnikiem zmiennym będzie kąt wyprzedzenia wtrysku.

## 5. Realizacja pomysłu

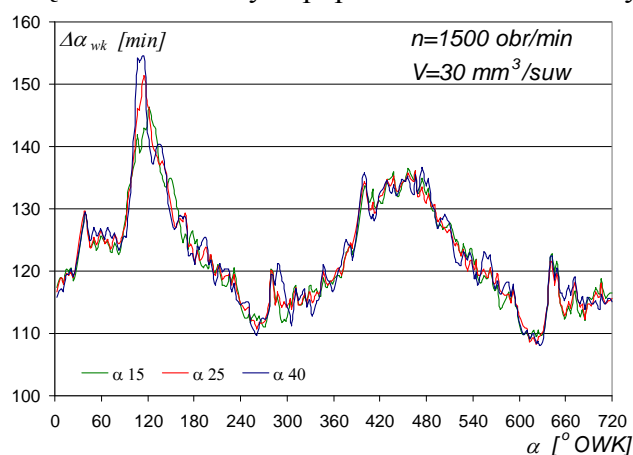
Jako obiekt badań wybrano jednostkę napędową ISUZU Y17DT znajdującą się na wyposażeniu Katedry Silników Spalinowych Politechniki Lubelskiej. Wybór silnika został podyktowany obszerną wiedzą, jaką dysponuje autor o tym silniku, a zwłaszcza związaną z transmisją diagnostyczną sterownika opartą o protokół KW 2000. W Politechnice Lubelskiej opracowany został program komputerowy wykorzystujący tę transmisję do przejścia kontroli nad silnikiem i zadawania własnych wielkości sterujących (rys. 6). System pomiarowy wyposażono dodatkowo w układ do pomiaru kąta skręcenia wału korbowego (fot. 1).



Rys. 6. Okno dialogowe komputerowego interfejsu silnika spalinowego ISUZU Y17DT

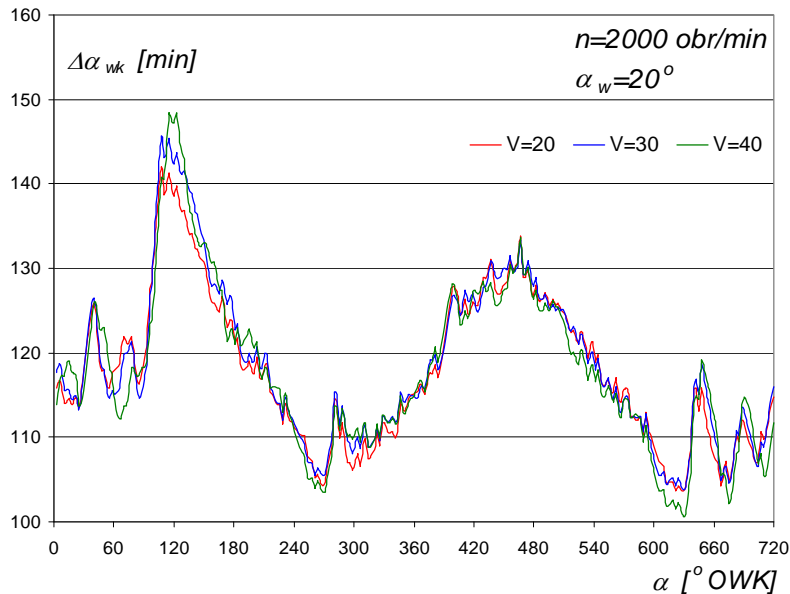
Fig. 6. Dialog window of ISUZU Y17DT engine computer interface

W pierwszej fazie przeprowadzono badania weryfikacyjne związane z porównaniem wpływu zamiany zastosowanego paliwa na uzyskaną charakterystykę obiektu. Jak dowodzą przeprowadzane badania, zmiana charakterystyki silnika spowodowała, że kąty wyprzedzenia wtrysku przestają być optymalne dla tego silnika i dopiero zastosowanie algorytmu adaptacji pozwoli na ponowne przybliżenie się do wielkości optymalnych. Zarejestrowano również przebieg sygnału skręcenia wału korbowego, podczas zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku w ustalonych warunkach pracy. Przebieg sygnału kąta skręcenia wału korbowego silnika ISUZU Y17DY rejestrowano dla różnych obciążeń realizowanych poprzez układ hamulcowy.



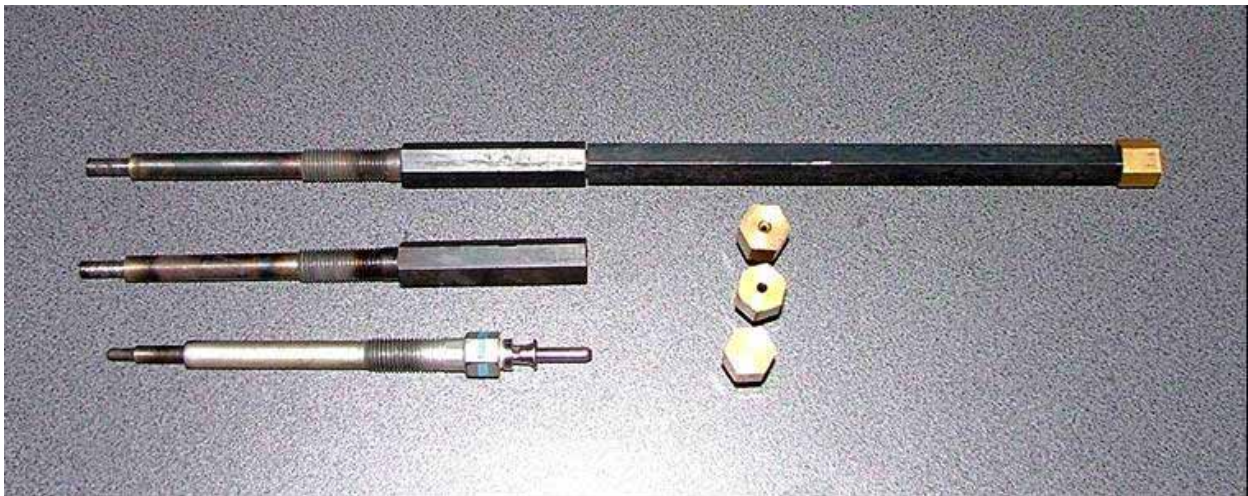
Rys. 7. Przebieg sygnału kąta skręcenia wału korbowego dla kilku wartości kąta wyprzedzenia wtrysku w ustalonych warunkach pracy silnika spalinowego ISUZU Y17DT

Fig. 7. Crankshaft torsion angle course for different injection advance angles in steady state of ISUZU Y17DT engine operation



Rys. 8. Przebieg sygnału skręcenia wału korbowego dla trzech obciążeń silnika ISUZU Y17DT  
 Fig. 8. Crankshaft torsion angle course for three different loads of ISUZU Y17DT engine

Badania symulacyjne i weryfikacyjne przeprowadzono dla celowo zmienionych charakterystyk silnika. Autor dokonał dwu zmian. Pierwsza związana z użyciem innego paliwa aniżeli paliwo powszechnie stosowane, tzn. z różnym stosunkiem domieszek oleju rzepakowego. Zmiana udziału oleju rzepakowego w paliwie powoduje potrzebę zmian przebiegu wtrysku [3, 4].



Rys. 9. Zestaw odprężników wraz z wymiennymi dyszami oraz świeca żarowa  
 Fig. 9. Set of cylinder pressure release devices with changeable nozzles

Drugim sposobem było zasymulowanie stopnia zużycia silnika. W tym celu dokonano zmiany konstrukcji silnika w postaci wymiany oryginalnych świec żarowych na elementy zmniejszające sprężanie w cylindrach silnika spalinowego poprzez przedmuch części spalin. Tak zmodyfikowany silnik symulował zmianę stopnia zużycia cylindra i uszczelnienia układu.

Oryginalne układy silnika nie są wyposażone w algorytmy dopasowujące wtrysk do takich zmian. Zaprezentowana metodyka badań pozwoli na syntezę modelu silnika, zidentyfikowanie jego struktury i parametrów opracowanie algorytmów sterowania zawierających mechanizmy adaptacji i wykorzystujące tor pomiarowy kąta skręcenia wału korbowego.

## 6. Podsumowanie

W trakcie realizacji pomysłu pojawiły się dwa problemy badawcze. Pierwszy problem to pytanie czy zaproponowany układ pomiarowy będzie w sposób adekwatny i wiarygodny informował o zdolności silnika do wytwarzania momentu obrotowego podobnie jak miało to miejsce w przypadku badań silników benzynowych. Drugi problem dotyczy wątpliwości czy algorytm adaptacyjny jest rozwiązaniem stabilnym a więc czy poszukiwanie optymalnego kąta wyprzedzenia wtrysku w wariancie on-line nie spowoduje niestabilności pracy silnika a tym samym nie spowoduje pogorszenia wskaźnika jakości pomimo użycia algorytmu adaptacyjnego z odpowiednio dobraną szybkością uczenia.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2007 jako projekt badawczy Nr 0401/T02/2006/30

## 7. Literatura

- [1] Jianqiu, L., Minggao, Y., Ming, Z., and Xihao, L., *Individual Cylinder Control of Diesel Engines*, Society of Automotive Engineering, 2002.
- [2] Kasedorf, J., *Zasilanie wtryskowe olejem napędowym*, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [3] Kiernicki, Z., *Wyniki wstępnych badań działania w warunkach nieustalonych silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego mieszaninami oleju napędowego i oleju rzepakowego*, Mat. Konf. KONMOT'94, Kraków-Raba Niżna 1993.
- [4] Lotko, W., Górski, K., Longwic, R., *Ocena wpływu kąta dynamicznego początku tłoczenia paliwa na opóźnienie samozapłonu w silniku zasilanym olejami reformułowanymi*, Journal of KONES: Internal Combustion Engines vol. 9 nr1-2, 2002.
- [5] Mauer, G. F., Watts, R. J., *On-Line Cylinder Diagnostics on Combustion Engines by Non contact Torque and Speed Measurements*, SAE paper no. 890485, in SAE SP-771, Sensors and Actuators 1989, presented at SAE Int'l. Congress and Exposition, Detroit, MI, Feb. 1989.
- [6] Poleszak, J., *Koncepcja adaptacyjnego sterowania kątem wyprzedzenia wtrysku w silniku o zapłonie samoczynnym*, II Sympozjum Doktoranckie, Mat. Konf., Lublin 2003.
- [7] Poleszak, J., *The adaptive control of the injection timing in the diesel engine*, KOKA 2006, 19<sup>th</sup>-20<sup>th</sup> September Praga 2006.
- [8] Rizzoni, G., *Estimate of Indicated Torque from Crankshaft Speed Fluctuations: Model for the Dynamics of IC Engine*, IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. VT-38 No. 3, pp 168-179.
- [9] Rizzoni, G., Drakunov, S. and Wang Y. Y., *On line estimation of indicated torque in IC engines a sliding model observers*, American Control Conference, Washington, pp.2123-2127. 1995.
- [10] Scotson, P., Wellstead, P., *Self-tuning optimisation of spark ignition automobile engines*, Proc. ACC, Pitts-burgh, USA, 1989
- [11] Wajand, J.A., *Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe* WNT, Warszawa 2005.
- [12] Wendeker M., Piernikarski D., Wituszyński K., *Adaptacyjny system sterowania silnikiem wysokoprężnym*, Materiały Konferencji AUTOMASIL'92, Poznań 1992.
- [13] Wendeker, M., Wituszyński K., *Koncepcja systemu sterowania tłokowym silnikiem spalinowym*, International Science Conference on Internal Combustion Engines KONES'92, Wrocław-Szklarska Poręba, wrzesień 1992.
- [14] Wendeker, M., Wituszyński, K., *Synteza prędkości kątowej wału korbowego*, I Sympozjum „Sterowanie silnikami samochodowymi”, Stawiska k/Kościerzyny, 15-17 czerwca 1993.



- [15] Wendeker, M., *Chwilowa prędkość kątowna i kąt skrećenia wału korbowego jako sygnały diagnostyczne*, Materiały na III Krajową Konferencję „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”, Szczyrk, 10-13 października 1995.
- [16] Wituszyński, K., *Prędkość kątowna i moment obrotowy jako nośniki informacji o stanie silnika spalinowego*, LTN, Lublin 1996.

