

# KONCEPCJA ADAPTACYJNEGO STEROWANIA KĄTEM WYPRZEDZENIA WTRYSKU W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

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

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 koncepcję budowy 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.

**Słowa kluczowe:** silnik ZS, sterowanie adaptacyjne, kąt wyprzedzenia wtrysku

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 concept 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.

**Keywords:** diesel engine, adaptive control, injection timing

### 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.

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.

Dzisiejsze układy sterowania wtryskiem umożliwiają rozdzielanie dawki paliwa na kilka dawek składowych: dawkę inicjującą, pilotażową, dawkę właściwą i ewentualnie dawki związane z procesem dotrysku i dopalania. O efektach procesu spalania decyduje chwila wtrysnięcia dawki pilotażowej. Wielkość dawki paliwa jest związana automatycznie z obciążeniem silnika (z potrzebami operatora czy też kierowcy) i możliwość jej zmiany jest ograniczona jedynie poziomem dymienia (czy też minimalną wartością współczynnika powietrza).

Dobór wielkości sterujących silnikiem wysokoprężnym jest poprzedzony precyzyjnym pomiarem warunków pracy silnika: obciążenie, prędkość obrotowa, temperatura i ciśnienie powietrza atmosferycznego, temperatura paliwa itp.

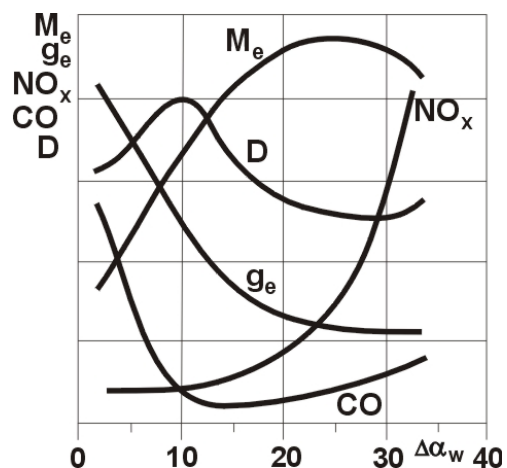
Jedną z podstawowych wielkości sterujących, dobieranych przez algorytm sterujący do aktualnych warunków pracy silnika wysokoprężnego, jest kąt wyprzedzenia wtrysku.

O ile o dawce paliwa wtryskiwanej do cylindrów decyduje głównie operator (kierowca) lub układ automatycznej prędkości jazdy, o tyle kąt wyprzedzenia wtrysku obliczany jest automatycznie przez sterownik.

### 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 emisją tlenków azotu 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, rysunek [2, 4]:



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka regulacyjna kąta wyprzedzenia wtrysku przedstawiająca wpływ zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku ( $\Delta\alpha_w$ ) na moment efektywny ( $M_e$ ), zadymienie spalin ( $D$ ), wydzielanie się związków toksycznych ( $CO$ ,  $NO_x$ ) oraz jednostkowe zużycie paliwa ( $g_e$ )

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.

### 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. Jest to istotne w świetle ostatnio omawianych pomysłów wprowadzenia dodatków biologicznych do powszechnie stosowanych paliw silnikowych. Wpływ na zmianę charakterystyk silnika mają również parametry niemierzone w pokładowych systemach sterowania, do których możemy zaliczyć wilgotność powietrza i bezpośrednie oddziaływanie promieni słonecznych powodujące nagrzewanie się pojazdu i elementów silnika.

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

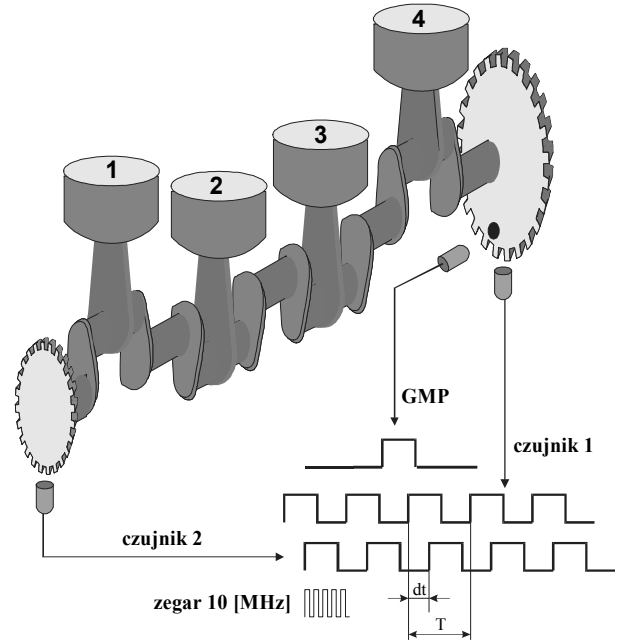
Zmiany charakterystyki obiektu oraz warunków jego użytkowania powodują, że uzyskanie maksymalnego wskaźnika jakości procesu roboczego nie jest możliwe bez użycia mechanizmów samouczących się. Jakość pracy silnika spalinowego definiowana jest poprzez zużycie paliwa, maksymalne osiągi silnika oraz poziom toksycznych składników spalin. Jak dotychczas nie występują w masowej produkcji silniki wyposażone w pokładowe systemy pomiaru toksyczności spalin, momentu obrotowego i zużycia paliwa. W literaturze naukowej spotyka się jedynie metody bazujące na szacowaniu takich osiągnięć w oparciu o warunki pracy silnika.

Wyniki działania algorytmów adaptacyjnych mogą być stosowane do badania, czy zaszły istotne zmiany obiektu a tym samym pozwalają na ciągłą optymalizację procesu spalania. Duża stopa niestacjonarności charakterystyk silnikowych stwarza trudności w odpowiednio szybkiej estymacji aktualnych parametrów modelu silnika zdefiniowanego w sterowniku. Zwłoka w uwzględnieniu zmiany obiektu przez algorytm sterowania (dawki wtrysku, kąta wtrysku) powoduje zwiększenie błędu regulacji. To zaś prowadzić może do pogorszenia chwilowych (podczas jazdy) osiągnięć silnika a co za tym idzie pogorszenia zdolności jezdnych pojazdu.

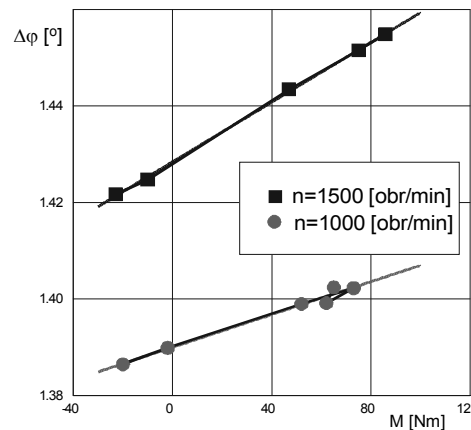
### 4. Idea adaptacji kąta wyprzedzenia wtrysku

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

przeciwnych 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 [5, 6, 7, 8, 13].



Rys. 2. Schemat układu pomiaru kąta skręcenia wału korbowego. Widoczne czujniki indukcyjne, koło zamachowe i koło zębate zamocowane w przedniej części wału [7]

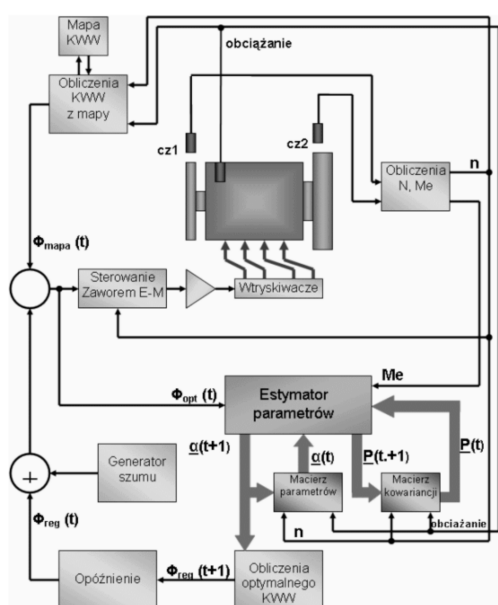


Rys. 3. Porównanie średnich wartości kąta skręcenia wału silnika 115.C ze zmierzonym momentem obrotowym [7]

Połączenie metody pomiaru kąta skręcenia wału korbowego silnika i metody adaptacyjnego dopasowywania kąta wyprzedzenia wtrysku pozwoli na nieustanne dobieranie kąta wyprzedzenia wtrysku do wartości gwarantującej uzyskanie optymalnego momentu obrotowego (rysunek 3). 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, zwłaszcza stężenia tlenków azotu w spalinach. Albowiem z reguły zwiększanie kąta wyprzedzania wtrysku

proceeds to an increase in nitrogen oxide concentration in the exhaust. In this case, the author intends to use available production measurement systems for nitrogen oxide concentration in the exhaust, i.e., sensors for NOx. Such sensors are produced, although by companies like Siemens Automotive or Delphi INTELLEK™ [14, 15]. The quality indicator will be a combination of the angular speed and the nitrogen oxide concentration in the exhaust. In this way, the quality indicator will be maximized, where the variable will be the injection advance angle.

The algorithm for selecting the injection advance angle will be based on the experience of the engine team from the Lubelska University of Technology in the field of adaptive engine control systems [7, 9, 10, 11, 12].



Rys. 4. Schemat idei adaptacyjnego systemu sterowania kątem wyprzedzenia wtrysku w celu uzyskania maksymalnej wartości momentu obrotowego

## 5. Realizacja pomysłu

Realization of the idea will proceed through the following stages:

- Budowa i identyfikacja modelu silnika, w którym zastosowany zostanie podmodel systemu pomiarowego kąta skręcenia wału korbowego. Taki podmodel pozwoli na przeprowadzenie badań symulacyjnych algorytmu sterowania silnikiem wysokoprężnym.
- Opracowanie adaptacyjnych algorytmów sterowania kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa w silniku wysokoprężnym.
- Wykonanie badań symulacyjnych.
- Weryfikacja doświadczalna wyników badań symulacyjnych.

As the object of study, an ISUZU Y17DT engine unit was chosen, located at the Lubelska University of Technology. The choice of the engine was based on the author's knowledge of this engine, and especially related to the transmission diagnostic control system based on the KW 2000 protocol. In Lubelska University of Technology, a computer program was developed to take control of the engine and set its own control parameters. The measurement system is additionally equipped with a nitrogen oxide sensor.

Verification and comparative studies will be related to the comparison of the control system of a factory-mounted engine with an adapted control system. According to the authors, the change in engine characteristics will lead to the fact that the injection advance angles will no longer be optimal for this engine, and only the application of the adaptation algorithm will allow for a return to optimal values.

Simulation and verification studies will be carried out for the purpose of changing engine characteristics. The author plans to make two changes. The first will be related to the use of a different fuel instead of the commonly used fuel, i.e., with a different content of additives in the diesel fuel. The change in the content of additives in the fuel leads to the need for changes in the injection process [1, 3].

The second way will be the simulation of the degree of engine wear. In this case, a change in the construction of the engine in the form of replacing original spark plugs with elements that reduce compression in the engine cylinders by increasing the exhaust gas flow. Such a modified engine will be characterized by a change in the degree of cylinder wear and sealing of the system. The change in sealing should lead to an increase in the injection advance angle due to the decrease in pressure and temperature in the cylinder, and at the same time, a delay in the chemical reaction in the time of self-ignition. Original engine systems are not equipped with algorithms that adapt injection to such changes. It seems that the author's adaptive algorithms will lead to the setting of a new, improved value of the injection advance angle. Such a verification will undoubtedly prove the correctness of the adopted reasoning.

The methodology of the studies will allow for the synthesis of the engine model, identification of its structure and parameters, development of adaptive control algorithms containing adaptation mechanisms and using the crankshaft angle and nitrogen oxide concentration in the exhaust.

## 6. Podsumowanie

Two questions arise: the first - whether the proposed measurement system will be adequate and reliable information about the engine's ability to produce torque. According to the author, the answer to this question should be positive. The second question concerns the stability of the adaptive algorithm, i.e., whether the search for the optimal injection advance angle in an on-line mode does not lead to engine instability and thus the search for the optimal injection advance angle in an on-line mode does not lead to engine instability and thus the search for the optimal injection advance angle in an on-line mode does not lead to engine instability. The answer to this question should be negative. The use of the adaptive algorithm with an appropriately chosen learning rate should guarantee the stability of the engine's work during the simultaneous achievement of the optimal injection advance angle.

### 7. Literatura

- [1] 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 Nizna 1993.
- [2] Kasedorf J.: *Zasilanie wtryskowe olejem napędowym*, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [3] Longwic R., Lotko W.: *Analiza wybranych parametrów procesu spalania silnika wysokoprężnego w warunkach nieustalonych zasilanego olejem rzepakowym*, Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN, Zeszyt nr 12, Kraków 1997.
- [4] Wajand J.A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*, WNT, Warszawa 1988.
- [5] Wendeker M., Wituszyński K.: *Koncepcja systemu sterowania tłokowym silnikiem spalinowym*, International Science Conference on Internal Combustion Engines KONES'92, Wrocław-Szklarska Poręba, wrzesień 1992.
- [6] Wendeker M., Wituszyński K.: *Synteza prędkości kątowej wału korbowego*, I Symposium „Sterowanie silnikami samochodowymi”, Stawiska k/Kościerzyna, 15-17 czerwca 1993.
- [7] Wendeker M.: *Adaptacyjna regulacja wtrysku benzyny w silniku o zapłonie iskrowym*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1998.
- [8] Wendeker M.: *Chwilowa prędkość kątowa i kąt skreślenia wału korbowego jako sygnały diagnostyczne*, Materiały na III Krajową Konferencję „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”, Szczyrk, 10-13 października 1995.
- [9] Wendeker M.: *Badania algorytmów sterujących samochodowym silnikiem benzynowym*, PWN, Warszawa 2000.
- [10] Wendeker M.: *Sterowanie wtryskiem benzyny w silniku samochodowym*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1999.
- [11] Wendeker M.: *Koncepcja i realizacja komputerowego algorytmu adaptacyjnego sterowania benzynowym silnikiem spalinowym*, raport grantowy nr 9T 12D 018-10, Lublin 1996.
- [12] Wendeker M., Piernikarski D., Wituszyński K.: *Adaptacyjny system sterowania silnikiem wysokoprężnym*, Materiały Konferencji AUTOMASIL'92, Poznań 1992.
- [13] Wituszyński K.: *Prędkość kątowa i moment obrotowy jako nośniki informacji o stanie silnika spalinowego*, LTN, Lublin 1996.
- [14] Siemens Automotive Corporation Document No. 1170, www.siemensauto.com, 1999
- [15] Delphi Technologies Lead To Energy Efficient Vehicles At The 2002 Future Car Congress, www.delphi.com 2002.

---

**Mgr inż. Jacek Poleszak**

*Katedra Silników Spalinowych*

*Wydział Mechaniczny*

*Politechnika Lubelska*

*ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin*

---