

Radosław WŁOSTOWSKI
Radosław WRÓBEL
Kamil TRZMIEL
Krzysztof DYRCZ
Leszek DĘBOWSKI

PTNSS–2013–SC–101

Analysis methods of measuring the pressure in the combustion chamber of an internal combustion engine in terms of use as a control signal in diesel engines

Abstract: The paper discusses current problems in the field of internal combustion engine control. The algorithms of the combustion engine control does not include directly the course of the pressure resulting from the combustion process. Currently used measurement methods are mainly based on pressure measurements using the accelerometric sensor, or the measurement of instantaneous changes in crankshaft rotational velocity, using the velocity sensor. In this way, the results obtained provides only information about the accuracy or the quality of the combustion process. The paper analyses the currently used methods of pressure in the combustion chamber measurement, deliberating on the indirect measurements utilisation (e.g., vibration using laser vibrometry) in order to obtain information about the pressure waveform.

Keywords: pressure measurement, control system, DSP

Analiza metod pomiarowych ciśnienia w komorze spalania silnika spalinowego w aspekcie zastosowania jako sygnału sterującego w silnikach o zapłonie samoczynnym

Streszczenie: Artykuł porusza obecne problemy z zakresu sterowania silnikiem spalinowym. W algorytmach sterowników silnika spalinowego nie uwzględnia się w sposób bezpośredni przebiegu ciśnienia procesu spalania. Wykorzystywane obecnie metody pomiarowe opierają się głównie o pomiary ciśnienia z użyciem czujników akcelerometrycznych, bądź pomiarów chwilowych zmian prędkości obrotowej wału korbowego, przy wykorzystaniu czujników prędkości obrotowej. W ten sposób otrzymane wyniki zawierają jedynie informację o poprawności bądź jakości procesu spalania. W artykule przeprowadzono analizę obecnie stosowanych metod odczytu ciśnienia w komorze spalania, przeprowadzając rozważania na temat zastosowania pomiarów pośrednich (np. drgań z użyciem wibrometrii laserowej) w celu otrzymania informacji o przebiegu ciśnienia.

Słowa kluczowe: pomiar ciśnienia, sterowanie, DSP

1. Wprowadzenie

Coraz ostrzejsze normy emisji spalin wprowadzane w Europie i na świecie narzucają konstruktorom większe wymagania odnośnie konstrukcji silnika jak i układów sterowania. Obecnie rozwój silnika spalinowego napotyka bariery w wielu aspektach, których przy obecnym poziomie technicznym nie można przekroczyć. Jako przykład można podać obserwowaną od kilkunastu lat tendencję do zwiększania ciśnienia wtrysku paliwa. W laboratoriach osiągnięto ciśnienia wtrysku w silniku o zapłonie samoczynnym na poziomie 2800 atmosfer. Przy tak ogromnym ciśnieniu paliwo ulega przemianom uniemożliwiając poprawny proces wtrysku, nie wspominając o zapotrzebowaniu energetycznym urządzenia wytwarzającego ciśnienie. Innym przykładem może być rozwój systemów oczyszczania spalin. Niektóre systemy wymagają do poprawnego działania dotrysku paliwa pod koniec suwu pracy w

1. Introduction

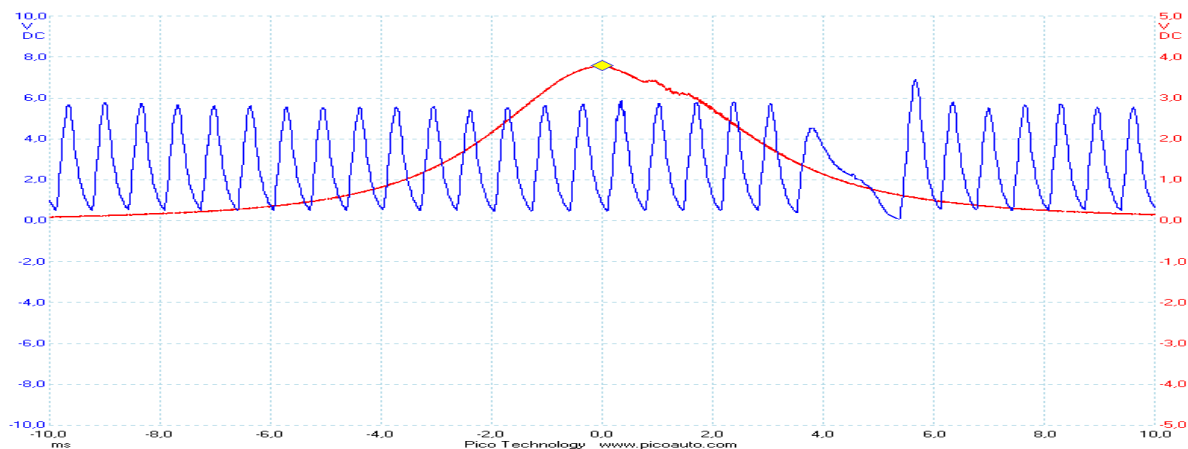
Increasingly stringent emissions standards established in Europe and worldwide imposes greater demands on designers in terms of the combustion engine and its control systems creation. Currently, the development of the internal combustion engine face barriers in many aspects, which due to the present technical level cannot be overcome. An example can be a trend observed for several years to increase the fuel injection pressure. The injection pressure obtained during the laboratory tests on a compression ignition engine reached 2800 atmospheres. Such a huge pressures forces the fuel to undergo a transformations precluding correct injection process, demanding a large amount of energy required for the pressure generating device. Another example would be the development of exhaust gas treatment systems. Some systems requires a fuel postinjection at the end of the power stroke, to

celu redukcji związków toksycznych spalinach. Powoduje to zwiększone zużycie paliwa a co za tym idzie zwiększoną emisję CO₂.

Filtry cząstek stałych zmniejszają masę odprowadzanych do atmosfery cząstek stałych jednocześnie zwiększając liczbę molekuł o małych rozmiarach. Im mniejsze cząstki stałe tym mniejsza ich skłonność do sedymentacji w powietrzu a więc stwarzają większe zagrożenie dla organizmów. Wszelkie rozważania w niniejszym artykule będą się opierały o układ sterowania silnika o zapłonie samoczynnym z układem Common-Rail.

2. Strategie sterowania

Strategia sterowania aktualnie stosowana w silniku spalinowym opiera się o opracowane na stanowiskach badawczych charakterystyki zapisane w pamięci sterownika. Na podstawie aktualnej prędkości obrotowej wału korbowego, wartości obciążenia (sygnał z elektronicznego pedału gazu) oraz ilości powietrza zasysanego odczytywane są ilość, czas i moment wtrysku, korygowane o szereg parametrów, m.in. warunki zewnętrzne, temperaturę silnika. Ważnym aspektem jest korekcja względem zmian pracy silnika wynikających ze zużycia. W algorytmie sterowania ujętych jest kilka interesujących, z punktu rozpatrywanego problemu, rozwiązań.



Rys. 1. Przebiegi napięcia czujnika położenia wału oraz piezokwarcowego czujnika ciśnienia po wzmocnieniu

Sterownik odczytuje prędkość obrotową na podstawie odczytu sygnału z czujnika najczęściej indukcyjnego oraz wieńca zębatego, umieszczonego bezpośrednio na wale korbowym. Dodatkowo ze względu na brak mechanicznego powiązania pomiędzy układem wytwarzania ciśnienia paliwa a układem wtryskowym, odczytuje sygnał położenia wałka rozrządu. Ów wieńiec zębaty składa się z kilkudziesięciu symetrycznych zębów oraz znacznika jednoznacznie określającego chwilowe położenie wału. Dzięki temu rozwiązaniu stało się możliwe zaimplementowanie funkcji adaptacyjnych. Odczyt i analiza chwilowych zmian

reduce toxic exhaust. This results in increased fuel consumption, and consequently increased CO₂ emissions.

The particulate filters reduces the mass of particles discharged to the atmosphere, simultaneously increasing the number of molecules of small size. The smaller the particle the less the tendency to sediment in the air, and therefore pose a greater risk to the living organisms. This paper discusses the control system of diesel engine with common-rail system.

2. Control strategy

The present strategy of engine control is based on the information gathered during the laboratory tests, and stored in the controllers memory. Such a features like the injection time and duration are determined basing on the instantaneous rotational velocity of the crankshaft, the load magnitude (signal from the electronic acceleration pedal) as well as the level of air suction. This is corrected by a numbers of parameters, e.g. the external engine temperature. One of the important aspect is the correction with respect to the change of the engines operation resulting from the wear. The control algorithms includes few very interesting solution concerning the deliberated problem.

The controller determines the rotation speed

based on the reading of the signal sensor (mostly inductive sensor) toothed-wheel rim, placed directly on the crankshaft. In addition, due to the lack of a mechanical link between the pressure generating system and the fuel injection system, the rotational velocity is determined based on the crankshaft position. That toothed ring consists of several symmetrical teeth and a tracker which unambiguously defines the position of the shaft. With this solution, it was possible to implement adaptive function. Measurement and analysis of the instantaneous changes in crankshafts rotational velocity, indirectly shows instantaneous changes in pressure

prędkości obrotowej w sposób pośredni ukazuje chwilowe zmiany ciśnienia w komorze spalania. Pozwala to odpowiednio korygować impulsy sterujące wtryskiwaczami w celu zminimalizowania nierównomierności generowanego momentu (redukcja „szarpnięć”). Pozwala również na podstawie analizy długookresowej, wyrównać średnie ciśnienia w poszczególnych cylindrach. Na rys. 1 przedstawiono przebieg sygnałów czujnika położenia wału oraz czujnika ciśnienia w komorze spalania w funkcji czasu dla silnika jednocylindrowego. Przeprowadzona analiza wykazała zależność pomiędzy szybkością wywiązywania ciśnienia a chwilowymi zmianami prędkości obrotowej. W przypadku silników wielocylindrowych analiza zmian prędkości obrotowej ukaże obraz przybliżony ze względu na wpływ poszczególnych cylindrów. W przypadku wystąpienia nieszczelności układu tłok-cylinder-głowica, sterownik może zataić istnienie usterki poprzez zwiększony wydatek wtryskiwacza.

3. Pomiary indykatorowe

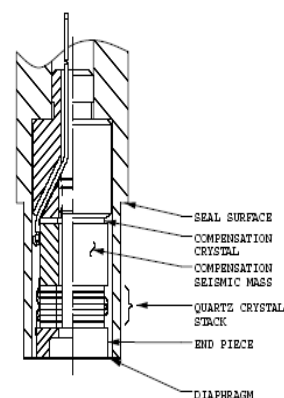
Podstawowym czujnikiem najczęściej wykorzystywanym do odczytu ciśnienia w komorze spalania jest układ piezoelektryczny (rys. 2). Czujniki indykatorowe mierzą ciśnienie w danym punkcie komory spalania, charakteryzują się one niewielką trwałością względem trwałości silnika oraz pewną histerzą temperaturową. Dodatkowo sygnał wyjściowy wymaga wzmocnienia, co sprawia iż jest podatny na zakłócenia. Zaleca się stosować krótkie połączenie pomiędzy czujnikiem a wzmacniaczem. Im dłuższy przewód łączeniowy pomiędzy czujnikiem a wzmacniaczem, tym większe zniekształcenia. Z tych względów zastosowania trakcyjne są mocno utrudnione.

Firma INES [1] prowadzi próby z wykorzystaniem czujnika mierzącego bezpośrednio ciśnienie w komorze spalania silnika gazowego oraz zastosowaniem w sterowaniu. Czujnik nie posiada wad czujników piezokwarcowych. Charakteryzuje się dużą odpornością na zmiany temperatury, odpornością na drgania, trwałością, małymi wymiarami oraz małym niewielkim dryftem sygnału pod wpływem nagłych zmian temperatury. W tym rozwiązaniu istotnym zniekształceniem jest długość i przekrój kanałów łączących i ich wpływ na odchyłki ciśnienia względem warunków rzeczywistych. Jednakże najistotniejszym w przypadku tego typów pomiarów jest odpowiednie umieszczenie czujnika ciśnienia.

Ciekawym rozwiązaniem jest rozwiązanie przedstawione przez firmę AVL wykorzystujące do pomiaru odkształcenia podkładki znajdujące się pomiędzy głowicą a blokiem cylindrowym silnika [2]. W tym przypadku otrzymujemy informację o sile działającej na głowicę pod wpływem wywiązującego się ciśnienia wewnątrz komory spalania.

utilization of the signal in control systems. This solution shows great resistance on the temperature changes, vibration resistance, durability, and relatively small signal drift occurring due to sudden temperature changes. The significant distortion is the length of the connecting ducts and their in the combustion chamber. This allows appropriate control of the injectors impulse adjusted to minimize non-uniformity generated torque (reduction of the "jerk"). Moreover, basing of the long term analysis, it also allows to equalize mean pressures in particular cylinder. Figure 1 shows signals representing the shaft position as well as the pressure within the combustion chamber of a single cylinder engine, as a function of time. The analysis showed a correlation between the rate of discharge pressure and temporary velocity changes. In case of the multiple cylinder engines, the analysis of the velocity change will reveal only approximated view due to the influence of particular cylinders.. In case of leakage of the piston-cylinder-head system, the controller can conceal the existence of an injector fault through increased injector expenditure, which will at least provoke the increase in exhaust gases emissions.

3. Indicator measurements



Rys. 2. Budowa czujnika piezokwarcowego

The most common system utilized for the measurement of the pressure inside the combustion chamber is a piezoelectric system (see Fig 2.). The indicator sensors measures the pressure in a specific location within the combustion chamber are characterized by some temperature hysteresis. Additionally the input signal requires an amplification, which makes it susceptible to noise. It is recommended to employ short lings between the sensor and the amplifier. The longer the cable connecting sensor with amplifier, the greater the noise. Taking this into consideration the traction applications are greatly interfered.

INES company [1] conducts engine tests with aid of sensor able to determine the pressures directly in the combustion chamber of a gas engine.

Tego typu pomiar jest pomiarem bardziej zbliżonym do wymagań sygnału sterującego procesem spalania, lecz dość trudnym do implementacji. Podobną informację uzyskać można mierząc naprężenia w śrubach mocujących głowicę cylindrową. Niestety na chwilę obecną tego typu pomiar wiąże się z zastosowaniem układów tensometrycznych, które charakteryzują się dużą histerezą temperaturową.

Podsumowując, badania procesów roboczych tj. indykowanie, pomiar zmian prędkości obrotowej, czy zmian momentu obrotowego daje nam tylko ogólny pogląd na jakość procesu spalania oraz ogólnego stanu silnika, nie dając zadowalających informacji diagnostycznych wymaganych ze względu na potrzeby układu sterowania.

4. Metody wibroakustyczne

Kolejną grupą metod pomiarowych są metody wykorzystujące pomiary drgań i hałasu. Wiele zespołów pracuje nad rozwojem tych metod [3, 4, 5, 6] przedstawiając możliwości diagnostyczne pomiaru drgań i hałasu.

Pomiar drgań można przeprowadzać mierząc przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie lub zmiany fazy drgającego obiektu. Widmo drgań zawiera ogromną ilość informacji diagnostycznej jednak jej pozyskanie jest trudne. Złożoność natury drgań generowanych przez silnik, duża ilość źródeł drgań oraz odpowiedni wybór punktu pomiarowego stanowi duży problem w odczytaniu informacji diagnostycznej [7].

Wielkości charakteryzujące można mierzyć w różny sposób, z czego najpopularniejszy jest pomiar akcelerometrami piezokwarcowymi. Wielkością fizyczną możliwą do zmierzenia tą metodą jest przyspieszenie. Natomiast mniej popularny pomiar wibrometrem laserowym daje możliwość bezpośredniego pomiaru prędkości względnej oraz przemieszczenia. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań wykazano, iż najbardziej pożądaną składową, niosącą najwięcej informacji niewymagających dodatkowych operacji przetwarzania, jest względna prędkość drgań zmierzona przy pomocy wibrometrii laserowej [8].

W warunkach laboratoryjnych analiza drgań przy pomocy wibrometru umieszczonego nieruchomo względem podłoża nie stanowi istotnego problemu, jednak w przypadku poruszającego się pojazdu, wpływ drgań zewnętrznych (przemieszczenia) stanowi istotne zniekształcenie. Pomiar należy wykonywać różnicowo przy wykorzystaniu co najmniej dwóch urządzeń, co wprowadza znaczne komplikacje w algorytmie sterującym.

The significant distortion is the length of the connecting ducts and their influence on the pressure deviation with respect to the real conditions. However, in case of such a measurement the most important is the appropriate pressure sensor location. The direct, spot measurement allows to obtain the pressure change at one point within the combustion chamber, which in some cases may be a reason of some adulteration. Therefore, considering the spot measurement as appropriate for control employs inaccuracy, enabling new ranges for new measurement techniques.

A beneficial measurement technics seems to be a solution provided by AVL company. Here, the measurement is performed basing on the deformation of the plate located between the engines head and the cylinder block [2]. This solution gives the information about forces acting on the engines head developed as a consequence of the pressure within the combustion chamber. This measurement technique is more suitable in terms of requirements of the signals controlling the combustion process, but it is relatively difficult to implement. Moreover, this same information can be obtained by measuring the stress occurring on the bolts connecting the engines head. Unfortunately such a measurement technics requires utilization of the extensometer systems which presently are characterized with large temperature hysteresis.

Summarizing, the measurement techniques of the working processes (i.e. indicator measurement, the change of the rotational velocity, or the change of torque) reveals only general view on the quality of the combustion process as well as the general engine condition. The diagnostic information, required for the appropriate control systems cannot be obtained.

4. Vibroacoustic methods

Next approach to the measurement techniques represents the vibroacoustic measurements of the noise vibrations and harshness (NVH) which are being developed by numerous teams [3, 4, 5, 6].

Here, the vibrations are determined by means of change in the velocity, acceleration, or phase reverse of the vibrating object.

The vibration spectrum is a source of vast number of the diagnostic information, however difficult to obtain. The complexity of the vibration generated by the engine, i.e. many vibration sources as well as appropriate selection of the measurement point makes the determination of the diagnostic information very difficult [7].

The characteristic values can be measured utilizing various procedures, however the most popular is the measurement conducted with aid of piezo-quartz accelerometers. The physical quantity, possible to determine using this method is the acceleration,

5. Podsumowanie

Wykorzystanie jako sygnału sterującego pomiaru ciśnienia w komorze spalania, do tej pory wiązało się z ograniczoną mocą obliczeniową sterowników. Podczas dotychczasowych badań zauważono, iż najistotniejszym zagadnieniem jest odpowiednie filtrowanie sygnału wymagające znacznej mocy obliczeniowej jednostki sterującej. Obecnie opracowany jest autorski układ, który umożliwia implementację odczytu ciśnienia w komorze spalania do algorytmu [9], równoległe prowadzone są badania w zakresie oczytnikowania.

Sterownik wykorzystuje procesor DSP odznaczający się możliwością obliczania bardziej skomplikowanych algorytmów, w tym obliczeń filtrujących. Wykazując przewagę pomiarów wibrometrycznych, zaplanowano przeprowadzenie w pierwszej kolejności badań umożliwiających zastosowanie wibrometru laserowego jako czujnika monitorującego przebieg procesu w komorze spalania, wykorzystania sygnału do sterowania procesem wtrysku w silniku spalinowym. Badania będą przeprowadzone w Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Wrocławskiej, przy współpracy Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Pwr oraz Instytutu Elektrotechniki oddział w Gdańsk.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowo-badawcze

whereas less popular laser vibrometry measurement allows the direct determination of the relative velocity and displacement. Studies conducted to date has shown that the most desirable component, carrying the most information, while not requiring additional processing is the relative velocity of vibrations, measured by means of laser vibrometry [8].

Under laboratory conditions the vibration analysis using laser vibrometry does not constitutes significant problem. However, in the case of moving vehicle the influence of external vibrations (displacements) is the source of significant distortion. The measurement should be diversified using at least two devices, which introduces a significant complication of the control algorithm.

Another possible solution is the acoustic measurements. The use of microphones, on the one hand, allows to skip to a certain extent the displacement with respect to the measuring device, while on the other hand, introduces a large amount of noises in the form of unwanted sounds which again poses a major challenge in the form of a suitable filtering or isolation system.

5. Conclusions

The usability of the control signal based on the combustion chamber pressure was limited by the computing power of present controllers. Basing on current investigation it has been found out that the most important issue is the appropriate signal filtration, which requires significant computation power. Now days, a novel system [9], which enables the implementation of the pressure within the combustion chamber readings to the algorithms has been developed. Simultaneously investigations concerning sensor installation are being performed.

The controller uses the DSP processor which is able to calculate very complicated algorithms as well as filtering calculations which constitutes a main problem concerning the vibroacoustics.

Emphasizing the superiority of the vibroacoustics, the further investigation was planned. This includes the research on the possibility to introduce a vibrometry as a measurement device which monitors the pressure within the combustion chamber. Then, signal obtained with aid of this method will be utilized to adjust the injection process in the combustion engines.

The research will be carried out at the Department of Motor Vehicles and Internal Combustion Engines of Wrocław University of Technology (PWr), in cooperation with the Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements (PWr), and the Electrical Institute in Gdańsk.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

DSP Digital Signal Processor/procesor sygnałowy

Bibliography/Literatura

- [1] Neumann S.: Integrated cylinder pressure measurement for gas engine control. *Combustion Engines* No. 4/2010(143).
- [2] Integrated pressure sensor systems in the cylinder-head gasket. *MTZ – Motortechnische Zeitschrift* 1/2004.
- [3] Szymański G., Tomaszewski F.: Vibroacoustic methods of assessing valve clearance in combustion engines. *Combustion Engines* No. 3/2010(142).
- [4] Fabiś P., Flekiewicz B., Flekiewicz M.: On board recognition of different fuels in SI engines with the use of dimensional and non-dimensional vibration signal parameters. *Combustion Engines* No. 1/2009 (136).
- [5] Chłopek Z., Maj M.: Uwagi o wykorzystywaniu sygnału ciśnienia czynnika w cylindrze do detekcji spalania stukowego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów nr 41 Warszawa 2001.*
- [6] Merkisz J., Waligórski M.: The application of the deterministic chaos method in the assessment of the combustion process in diesel engines fitted in non-road vehicles. *Combustion Engines*, No. 4/2011(147).
- [7] Szymański G., Tomaszewski F.: Experimental method for the selection of points of measurement. *Combustion Engines* No. 3/2012.
- [8] Miksiewicz K., Kaźmierczak A., Reksa M., Tkaczyk M., Wróbel R.: The Comparative analysis of the diesel and spark-ignition (with supercharger) engines vibrations. *Combustion Engines* No. 3/2011(146).
- [9] Dębowski L., Dyrzc K., Kawaliłło P., Trzmiel K., Włostowski R., Wróbel R.: *Koncepcja nowego koputera pokładowego ECU do sterowania silnikiem pojazdu samochodowego z wykorzystaniem DSP. Prace naukowe IMNi-PE PWR nr 31 Wrocław 2011.*

Mr Radosław Włostowski, MSc. Eng. – Faculty of Mechanical Engineering at Wrocław University of Technology.

Mgr inż. Radosław Włostowski – Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej.



Mr Radosław Wróbel, DEng. – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Wrocław University of Technology.

Dr inż. Radosław Wróbel – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej.



Mr Trzmiel Kamil, Eng. – Faculty of Mechanical Engineering at Wrocław University of Technology.

Inż. Kamil Trzmiel – Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej.



Mr Krzysztof Dyrzc, DEng. – Doctor in the Faculty of Electronic at Wrocław University of Technology.

Dr inż. Krzysztof Dyrzc – adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej.



Mr Leszek Dębowski, MSc. Eng. – Electrotechnical Institute Gdansk Branch

Mgr inż. Leszek Dębowski – Instytut Elektrotechniki, Oddział w Gdańsku.

