

## METODY POMIARU PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ W MECHATRONICE

*W artykule omówione zostały metody pomiaru prędkości obrotowej. Zaprezentowano metody klasyczne, jak i nową metodę, wykorzystującą pomiar drgań, jako funkcję wejściową w procesie otrzymania wyniku wartości prędkości obrotowej wału korbowego. Przedstawiono klasyczny tor diagnostyczny, a także operacje cyfrowego przetwarzania sygnałów, niezbędne do otrzymania właściwej wiadomości diagnostycznej. W pracy znajdują się także informacje, dotyczące magistrali CAN, a także systemu EOBD*

### WSTĘP. DIAGNOSTYKA W POJAZDACH SAMOCHODOWYCH

W pojeździe samochodowym, diagnostyce podlegają niemal wszystkie elementy (nie tylko mechaniczne). Znajdują zastosowanie prawie wszystkie czujniki, stosowane w innych dziedzinach inżynierii [1]: czujniki temperatury, stężenia gazów, siły, momentów, ciśnienia, przyspieszenia, drgań, prędkości, a także przepływomierze. Czujnik przetwarza badaną wielkość fizyczną lub chemiczną w sygnał elektryczny. Każdy czujnik charakteryzują dwa równania: wejściowe (1) i wyjściowe (2).

$$\Phi = f(E, Y) \quad (1)$$

$$E = g(\Phi, Y) \quad (2)$$

Gdzie:  $\Phi$  – badana wielkość,  $E$  – elektryczny sygnał wyjściowy,  $Y$  – zakłócenia.

Elektryczny sygnał wyjściowy czujnika jest proporcjonalny do badanej wielkości wejściowej. Zauważalny jest wpływ wielkości zakłócających, opisanych jako składnik funkcji (którego nie można bagatelizować).

Współczesne pojazdy samochodowe są wyposażone w standard diagnostyczny, nazywany europejskim systemem diagnostyki pokładowej (EOBD), będący powieleniem amerykańskiego standardu OBDII (*On Board Diagnosis II*), który powstał w roku 1988 w stanie Kalifornia (USA) [2]. Standard ten był wynikiem ponad 20 letnich badań nad zmniejszeniem emisyjności spalin do atmosfery. System ten charakteryzują [3]:

1. Konieczność informowania o wystąpieniu usterki, mogącej mieć wpływ na zanieczyszczenia spalin składnikami toksycznymi.
2. Obowiązek posiadania przez każdy pojazd systemu umożliwiającego autodiagnostykę.
3. Pewność, że informacja o każdej usterce trafi do użytkownika, a jednocześnie będzie zapamiętana.

W roku 1994 wprowadzono system OBDII. Często w literaturze można spotkać błąd, polegający na porównywaniu systemu OBD i EOBD. Tymczasem standard EOBD jest odpowiednikiem standardu OBD drugiej generacji.

Podstawowym zadaniem, stawianym przed pojazdami, zaopatrzonymi w EOBD/OBDII jest ochrona środowiska naturalnego przez ciągłą kontrolę spalin i układów je generujących. Każdy pojazd wyposażony w ten standard jest wyposażony w system, umożliwiający bieżącą diagnostykę 849 usterek [2,4].

Obecnie trwają prace nad wprowadzeniem systemu EOBDII. Nie tylko określi on dodatkową grupę usterek, które muszą być

diagnozowane, ale także będzie ściśle współpracował z serwisem. W ciągu kilku lat diagnostyczny system pokładowy nie tylko na bieżąco będzie wykrywał usterki, ale także je przewidywał i bez udziału użytkownika umawiał się na wizytę serwisową. Właściciel pojazdu zostanie tylko zapytany, czy dany dzień i godzina są odpowiednie. Przedstawiona praca ma na celu przedstawienie cyfrowego przetwarzania sygnałów i możliwości implementacji w bieżącej autodiagnostyce samochodowej. Tor diagnostyczny, wyposażony w ten typ przetwarzania umożliwi skrócenie czasu diagnozy (do czasu quasi rzeczywistego), a przez to zwiększy ilości wykrywanych usterek.

Integralną częścią EOBD jest magistrala, przenosząca informację. Od 2008 roku magistralą tą, obligatoryjnie montowaną w każdym nowym pojeździe samochodowym jest CAN (*Controlled Area Network*) [3]. Topologią CAN jest magistrala, oparta o dwuprzewodowy kabel miedziany typu skrętka. Maksymalna długość magistrali to 40m, a połączenia z czujnikami (odgałęzienia) nie powinny być dłuższe niż 0,3m [6]. Wymiana informacji w sieci, opartej na magistrali CAN, może odbywać się dwojako: przez rozgłaszanie lub adresowanie. Rozgłaszanie, podobnie jak w przypadku globalnych systemów informacyjnych, opartych na modelu OSI/ISO, polega na wysłaniu wiadomości do każdego dostępnego węzła sieci. W tym przypadku ramka danych, wysłana przez adresującego, nie jest opatrzona informacją, zawierającą adres docelowy. Takie postępowanie warunkuje szybsze przekazywanie informacji w sieci przez skrócenie czasu odczytywania adresu w węźle odbiorczym. Adresowanie rozgłoszeniowe jest stosowane tylko w przypadku ramek o wysokim priorytecie (aby uniknąć zjawiska burzy rozgłoszeń w przypadku dużych topologii), zawierających wyjątkowo istotne informacje (np. okresowy pomiar ciśnienia). Wówczas węzeł sieci samodzielnie decyduje, czy rozgłoszona informacja jest mu potrzebna, a jednostka decyzyjna wykonuje algorytm postępowania, właściwy dla otrzymanej informacji.

### 1. INDUKCYJNY POMIAR PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ

Czujniki indukcyjne są szeroko stosowane w pojazdach samochodowych. Wynika to z dużej odporności na drgania i przybrudzenia, a także szybkim, analogowym pomiarze wartości prędkości obrotowej. W czujnikach indukcyjnych, bez względu na sposób pomiaru, najważniejszym medium informacyjnym jest wektor indukcji magnetycznej, charakteryzujący wypadkowe pole magnetyczne, będące wartością określającą siłę, jaką pole magnetyczne działa na jednostkę długości przewodnika, umieszczonego prostopadłe do kierunku działania tego pola [7]. Wartość wektora indukcji (w próżni) określana jest wzorem:

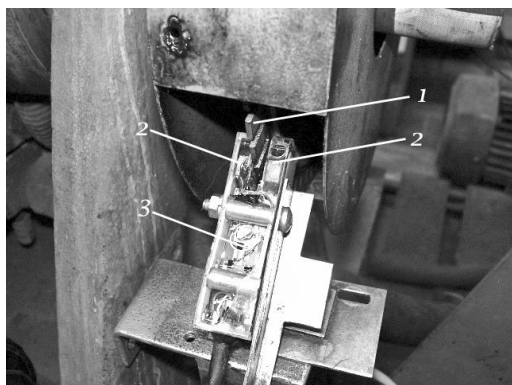
$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [T] \quad (3)$$

gdzie:  $r$  – odległość punktu pomiarowego od przewodnika,  $\mu_0$  – bezwzględna przenikalność magnetyczna,  $I$  – wartość prądu płynącego w przewodniku.

Czujniki indukcyjne pomiaru wartości prędkości obrotowej dzielą się na dwie grupy:

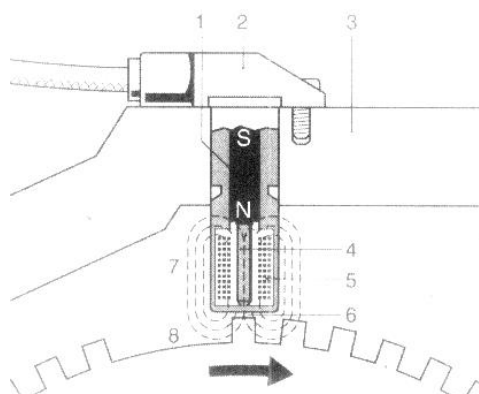
1. Czujniki transformatorowe.
2. Czujniki magnetoindukcyjne reluktancyjne.

Czujniki transformatorowe wykorzystują zjawisko siły elektromotorycznej, indukowanej przez uzwojenie pierwotne w uzwojeniu wtórny przy różnym sprzężeniu obydwu zwoi [8]. Czujnik taki generuje SEM, wprost proporcjonalną do wartości strumienia magnetycznego, która jest zależna od przenikalności magnetycznej materiału. Wykorzystując koło impulsowe, będące ruchomym rdzeniem zamykającym obwód magnetyczny (rys. nr 1), dzięki czemu zostaje wytworzony ciąg impulsów (przez zmianę przenikalności), które następnie zostają zsumowane. Uzyskana suma w jednostce czasu odpowiada prędkości wału korbowego. Do wad tego rodzaju czujników należy ograniczona możliwość pomiaru małych prędkości. Są także mało odporne na działanie silnych zewnętrznych pól magnetycznych.



**Rys. 1** Czujnik transformatorowy prędkości obrotowej; 1- koło impulsowe; 2 – uzwojenia transformatora (po stronie lewej pierwotne), 3 – układy kondycjonujące.

Czujniki magnetoindukcyjne działają na zasadzie indukowania SEM w solenoidzie. Pod wpływem ruchu ferromagnetycznego koła zębatego, który powoduje zastąpienie (impulsowe) części rdzenia powietrznego rdzeniem ferromagnetycznym (rys. nr 2).



**Rys. 2** Reluktancyjny czujnik prędkości obrotowej [8]; 1- magnes, 2- korpus, 3- kadłub silnika, 4- rdzeń magnesu, 5- cewka, 6- szczelina powietrzna, 7- pole magnetyczne, 8- ferromagnetyczne koło impulsowe.

Czujniki magnetoindukcyjne, działające z pojedynczą cewką (lub równoległe – kilkoma) wytwarzają napięcie, wprost proporcjonalne do wartości strumienia magnetycznego (a to jest tym większe im mniejsza reluktancja rdzenia):

$$SEM = z \frac{d\phi}{dt} \quad [V] \quad (4)$$

Wadą tego rodzaju czujników, podobnie jak transformatorowych jest mała odporność na silne zewnętrzne pola magnetyczne, a także mała dokładność pomiaru przy małych wartościach  $d\phi$ , odpowiadających za wartość prędkości obrotowej.

## 2. POMIAR DRGAŃ SILNIKA

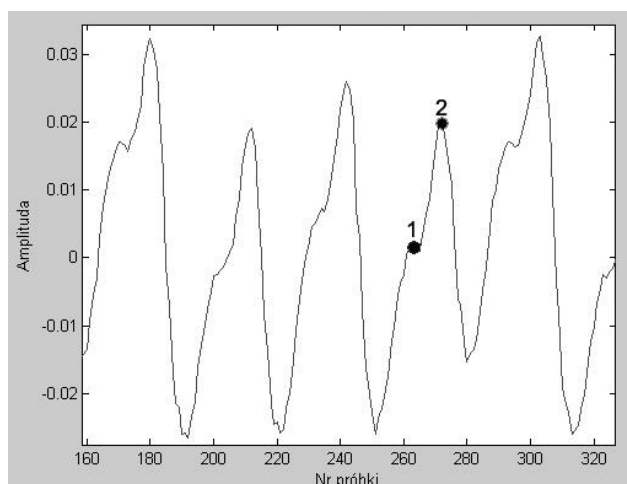
Drgania wibroakustyczne to zjawisko, polegające na ruchu układu materialnego, wokół punktu równowagi statycznej, które polega na przepływie i akumulowaniu energii o wartości dostatecznej do powstania źródła dźwięku o natężeniu wystarczającym do wywołania ludzkiego wrażenia słuchowego, ale jednocześnie mogące przekroczyć zakres częstotliwości słyszalnych przez ludzi.

Drgania wibroakustyczne są używane jako synonim wielkości je charakteryzujących, do których należą [9]:

1. Przemieszczenie.
2. Przemieszczenie względne.
3. Prędkość.
4. Prędkość względna.
5. Przyspieszenie.
6. Przesunięcie fazowe harmonicznej.

Wielkości charakteryzujące są mierzone różnymi metodami z których należy wyróżnić akcelerometrię piezoelektryczną oraz ostatnio coraz bardziej popularną wibrometrię laserową. Metoda pomiarowa jest ściśle powiązana z mierzoną wielkością. W przypadku akcelerometrii, wielkością mierzoną bezpośrednio jest przyspieszenie względne, natomiast w przypadku wibrometrii przemieszczenie względne. Inne wielkości są mierzone w układach diagnostycznych, ale są wynikiem przekształceń wielkości podstawowych.

Drgania silnika są ściśle związane z procesem spalania. Badania wykazały, że bez względu na miejsce detekcji drgań (kadłub, miska olejowa czy głowica) otrzymuje się informację diagnostyczną, będącą mniej lub bardziej wyraźnym odwzorowaniem procesu spalania (rys. 3)



**Rys. 3** Drgania silnika, mierzone wibrometrią laserową na misce olejowej; 1 – momentu wtrysku paliwa, 2 – spalanie.

### 3. PRZEKSZTAŁCENIA SYGNAŁY DRGAŃ

Wszystkie operacje cyfrowego przetwarzania sygnałów, użyte w badaniach, mają na celu zmienić kształt widma sygnału w sposób powtarzalny z użyciem znanych i wykorzystywanych metod. Podstawową operacją jest okienkowanie sygnału. W tym wypadku w dziedzinie czasu, ponieważ ogranicza się przy tym tylko do operacji mnożenia dyskretnego sygnału drgań i dyskretnego widma okna. Oczywiście możliwe jest wykorzystanie okna w dziedzinie częstotliwości, ale wymagałoby to operacji splotu wymienionych sygnałów dyskretnych. Idealny ciąg okienkujący, miałby widmo o charakterze prostokątnym, aby tłumić nie charakterystyczne (z punktu widzenia badań) części widma, przy jednoczesnym wzmocnieniu części charakterystycznych. Idealne okno nie zniekształcałoby sygnału badanego i pozwalało uniknięcia przecieku widmowego (zjawisko, polegające na ujawnieniu się części składowej sygnału, nie leżącej przy częstotliwościach, dla których dokonujemy analizy, we wszystkich wyjściowych wartościach dyskretnych sygnału po transformacji do dziedziny częstotliwości [10]). Uzyskanie prostokątnej charakterystyki częstotliwościowej okna jest niemożliwe, koniecznym staje się kompromis, polegający na zastosowaniu najlepszego, z punktu widzenia badań, ciągu okienkującego. Doświadczalnie stwierdzono, że dobrym rozwiązaniem jest okno typu „Flap Top”. Okno to charakteryzuje mała rozdzielczość przy dużej dynamice [11]. Ponadto charakteryzuje się znaczną dokładnością w odzwierciedlaniu amplitudy. Wartości dla tego rodzaju okna uzyskuje się z poniższego wzoru (5)[11]:

$$\omega(t) = 1 - 1,93 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + 1,29 \cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) - 0,388 \cos\left(\frac{6\pi}{T}t\right) + 0,0322 \cos\left(\frac{8\pi}{T}t\right) \quad (5)$$

gdzie:  $0 \leq t \leq T$  i  $\omega(t)=0$  dla wartości spoza dziedziny.

Po „okienkowaniu”, sygnał podlega transformacji do dziedziny częstotliwości przy zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera o podstawie 2. Wyprowadzenie algorytmu FFT jest znane od 1965 roku i szeroko opisywane w literaturze [10, 11]. Wykorzystana postać szybkiej transformaty Fouriera dla sygnałów dyskretnych ma postać opisaną wzorem (6):

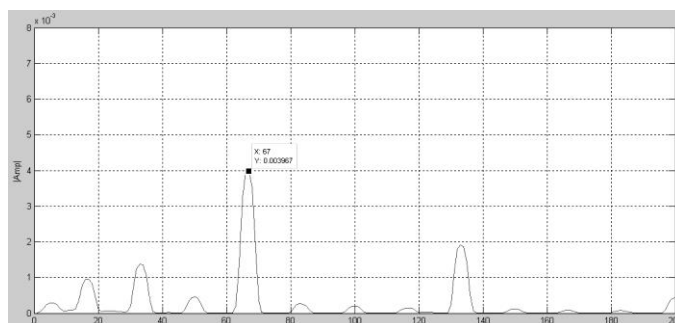
$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (6)$$

gdzie:  $\omega_N = \exp\left(\frac{-2\pi i}{N}\right)$ ; N- ilość próbek, k- bieżąca próbka dziedziny częstotliwości, j – bieżąca próbka dziedziny czasu.

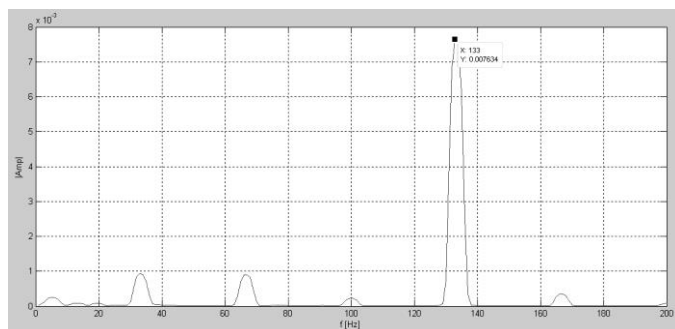
Użyty algorytm pozwala na znacznie przyspieszenie obliczeń, a współczesny komputer, pozwala na uzyskanie wyników w kilka sekund.

### 4. POMIAR PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ NA PODSTAWIE POMIARU DRGAŃ

Rysunek 4 i 5 przedstawiają widmo częstotliwościowe silnika VW 1,9 TDi JTD dla prędkości 2000 i 4000 rpm. Wartość momentu wynosi 100Nm i nie ma wpływu na rozkład częstotliwości, a jedynie na amplitudę prążków.



Rys. 4 Widmo drgań silnika VW 1,9TDi JTD,  $\omega=2000$  rpm,  $M_o=100$ Nm.



Rys. 5 Widmo drgań silnika VW 1,9TDi JTD,  $\omega=4000$  rpm,  $M_o=100$ Nm.

Wartości częstotliwości dla harmonicznych dominujących wynoszą 67 ( $\omega=2000$  rpm) oraz 133Hz ( $\omega=4000$  rpm). Wartości te, pomnożone przez stałą, wynoszącą w tym wypadku 30, pozwalają na uzyskanie empirycznych wartości prędkości obrotowej, wynoszącej 2010 i 3990 rpm. Należy zauważyć, że błąd względny pomiaru, jeżeli wartością oczekiwaną będą wartości pochodzące z czujników (czyli 2000 i 4000) wynosi w obu przypadkach 0,50%. Jest to błąd mniejszy niż niepewność pomiaru układu oryginalnych czujników i przetworników silnika. Ponadto pomiar został dokonany metodą bezdotykową, poprzez pomiar drgań promieniem lasera wibrometru.

### PODSUMOWANIE

Oprócz klasycznych metod pomiaru prędkości obrotowej, nowa metoda wydaje się być bardzo dobrym rozwiązaniem serwisowym. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku użycia dopplerowskich metod pomiaru drgań (które niestety są ciągle stosunkowo drogie), nie wymagany jest bezpośredni dostęp do obiektu (wystarczy miejsce w którym odbije się wiązka). Wibroakustyczna metoda pomiaru doskonale sprawdzi się w warsztatach i stacjach obsługi.

### BIBLIOGRAFIA

1. Bosch: *Czujniki w pojazdach samochodowych*, informator techniczny, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002
2. „Poradnik Serwisowy – kompendium praktycznej wiedzy warsztatowej”, nr 5/2003, str. 63 – 82.
3. Merksiz J., Mazurek S.: *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002
4. [http://www.obdii.com/codes\\_request.asp](http://www.obdii.com/codes_request.asp)
5. *Elektronika Praktyczna Magistrala CAN*, nr 1/2000
6. <http://www.canopen.pl>
7. Praca zbiorowa: *Słownik Fizyczny*, Wyd. „Wiedza Powszechna”, Warszawa 1996
8. Gajek A., Juda Z.: *Czujniki*, WKŁ, Warszawa 2008

9. Kucharski T. *System pomiaru drgań mechanicznych*, WNT, Warszawa 2002
10. Stranneby D., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Metody, algorytmy, zastosowanie*, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004
11. Lyons R.G.: *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Wydawnictwo WKŁ, Warszawa 2006

## Methods of measuring crankshaft speed in mechatronics

*The article discusses methods of measuring rotational speed. Classical methods as well as a new method using vibration measurement as the input function in the process of obtaining the result of the crankshaft rotational speed were*

*presented. A classic diagnostic path, as well as digital signal processing, is required to obtain the correct diagnostic INFORMATION. The work also includes information on the CAN bus as well as the EOBD system.*

Autorzy:

mgr inż. **Monka Andrych - Zalewska** – Politechnika Wrocławska, Katedra Inżynierii Pojazdów, monika.andrych@pwr.edu.pl

mgr inż. **Radosław Włostowski** – Politechnika Wrocławska, Katedra Inżynierii Pojazdów, radoslaw.wlostowski@pwr.edu.pl

dr inż. **Radosław Wróbel** – Politechnika Wrocławska, Katedra Inżynierii Pojazdów, radoslaw.wrobel@pwr.edu.pl