

Mirosław DERESZEWSKI, Grzegorz SIKORA
 Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

DIAGNOSTICS OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINES OPERATION BY MEASUREMENT OF CRANKSHAFT INSTANTANEOUS ANGULAR SPEED

Diagnostyka pracy silników spalinowych przy pomocy pomiaru chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego

Abstract: *Diagnostics based on measuring of crankshaft instantaneous rotational speed allows precise location of damage to the injection system and detection of external disturbances. Active measurement of instantaneous rotational speed requires use of equipment with high sensitivity, permanent assembly at the ends of the crankshaft and the analysis of a very large amount of data.*

Presented method can be used for measurement of torsional vibration of crankshaft, indirectly through simultaneous measurement of the width of the pulses generated by the encoder disks. Momentary, relative displacement of both disks determines the angle of temporary crankshaft twisting. This paper presents first results of pulse width measurement, obtained by using described system.

Keywords: torsional vibrations, incremental encoder, angular speed

Streszczenie: *Diagnostyka metodą pomiarów chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego umożliwia precyzyjną lokalizację uszkodzeń układu wtryskowego oraz wykrywanie zakłóceń zewnętrznych. Aktywny pomiar chwilowej prędkości obrotowej wymaga zastosowania aparatury o dużej czułości, trwałego montażu na końcach wału korbowego oraz analizy bardzo dużej ilości danych.*

Przedstawiona metoda może posłużyć do obliczania drgań skrętnych wału korbowego pośrednio poprzez symultaniczny pomiar szerokości pulsów generowanych przez tarcze enkoderów. Chwilowe, względne przemieszczenie obu tarcz określa kąt chwilowego skręcenia wału korbowego. W artykule przedstawiono wyniki pierwszych pomiarów szerokości impulsów, uzyskane na opisanym stanowisku badawczym.

Słowa kluczowe: drgania skrętne, enkoder inkrementalny, chwilowa prędkość kątowa

1. Introduction

Marine Diesel Engines are widely used on board of vessels as a main propulsion and auxiliary engines, e.g. diesel generators. Majority of them are low or medium speed engines, within revolutionary speed span from 90 up to 800 rpm (revolutions per minute). Due to importance of such mechanisms for ships operation and safety, and obvious fact that reparation on board is complicated by rough sea state and limited spare parts supply, to ensure reliability of these engines is primary importance. Engine's condition monitoring helps predict and avoid failures of equipment.

Measurement of the instantaneous rotational speed of the crankshaft of internal combustion engines is in recent years a dynamically developing diagnostic method for testing the operation of internal combustion engines. This method is developed by scientists from many countries [1, 4, 5, 7], engine manufacturers, and also manufacturers of torsional vibration dampers. Measurement of the instantaneous rotational speed is performed using one encoder placed at one end of the crankshaft. However, measurement of torsional vibrations in most cases, is carried out using two encoders placed on opposite sides of the crankshaft.

Diagnostic is not the only application for information contained in instantaneous rotational speed. Accurate measurement of instantaneous rotational speed and prediction of values for subsequent crankshaft rotations can be used for active optimisation the process of controlling engine subsystems, e.g. speed controller, change of fuel dose or change in the characteristics of torsional vibration dampers filled with ferrofluids [6].

The type of encoders, data acquisition equipment, sampling rates and further data processing are the elements determining the results of individual researches. Assumptions for the presented method of measuring of instantaneous rotational speed are as follows:

- high sampling rate
- universal and easy assembly of encoders on the engines;
- use of commonly accessible automation devices and for data acquisition;
- development of algorithms for data acquisition and diagnostic, ensuring active monitoring.

2. Principle of measurement

Measurements performed with incremental encoders usually concern the angular position of the shaft, edge counting and pulse width. Incremental encoders that are commercially available usually provide a zero signal for accurate referencing the angle of rotation. In described encoders, the optical discs are divided into two coaxial parts and misaligned in 90° from each other. Each part is divided into 100 impulses, and one impulse consists of equal parts of high and low states. The only exception are pulses around 0°, where the geometric differences are compensated. From these geometric relations, the

number of edges is 200 for each of the two parts of the encoder disk. This results in 400 edges for each encoder, what divides encoder disk on $0,9^\circ$ parts.

The measurement starts at any time when the engine is running, whereas the reference signal corresponds to the TDC of the first cylinder. From the measurement initiation moment, each $1\mu\text{s}$ (for the sample rate of 1MHz), the binary state of individual encoder outputs is queried. For each encoder, the states from three channels are queried: A and B from two parts of encoder discs and Z, which corresponds to 0° . After detecting the edge on any part of encoder disk, pulses are totalized from the previous edge and the counter is zeroed. It should be noted that the process of totalizing, counter zeroing and data recording takes place with the participation of the computer processor.

Transfer and data recording for sample rate of 1MHz and 6 channels has to be performed by the minimal speed of 6Mb/s. Due to such a large amount of data, it is necessary to use appropriate software and optimize algorithms for quick data storage.

3. Object of research

The main engine particulars are reported in tab.1. It is turbocharged medium speed diesel engine designed by Sulzer. This 3- cylinder in row engine develops 408 kW, at rotational speed of 750 rpm. The engine drives alternate current electro generator GD8-500-50, 500kVA, connected to the main electric board. The load of the engine can be fluently adjusted by changing of the load of generator (adjustable resistor). The high pressure fuel system has three injection pumps, one for each cylinder. General view of the engine is presented in fig. 1 [2].

Table 1

Engine technical particulars

Manufacturer	HCP Cegielski/Sulzer
Type	3 AL 25/30
Rated power (kW)	408
Cylinder number	3
Cylinder swept capacity (cm^3)	4922
Rotational speed (rpm)	750
Compression ratio	13:1

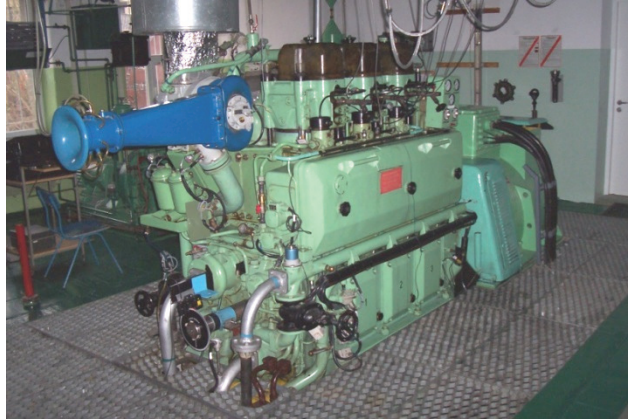


Fig. 1. General view of the Sulzer 3 AL 25/30

4. Measurement equipment

Measurement equipment consist of the following components:

- two incremental encoders from Leine&Linde, mounted ontheopposite sides of the crankshaft;
- data acquisition system Sefram DAS1400 with sampling rate of 1MHz and additional data acquisition system National Instruments NI 9401 with sampling rate of 10MHz;
- personal computer with Matlab and DAQmx software.

Parameter of the encoder used, which are shown in fig. 2, are presented in tab.2.

Table 2

Encoder data

Manufacturer	Leine&Linde
Type	RHI 503
Line count	100 ppr
Dividing error	$\pm 50^\circ \text{el}$
Channel separation	$90 \pm 25^\circ \text{el}$
Measuring steps	4 x Line count
Output signal	TTL
Output frequency (max)	300 kHz
Mechanical permissible speed	6000 rpm

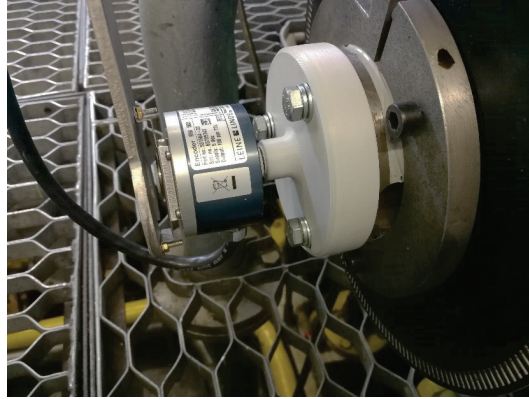


Fig. 2. Front incremental encoder

For the preliminary research, the Sefram DAS 1400 (fig. 3) data acquisition system was used. This system allows to acquire data with 1 MHz sampling rate from 16 digital channels. First data record, due to required record speed, executes in binary mode, in ROM memory blocks. Due to this big amount of data being saved during measurement, duration of this measurement is reduced to 33,6 s. After measurement, data is being saved on hard drive, from where can be transferred to personal computer for further analysis.

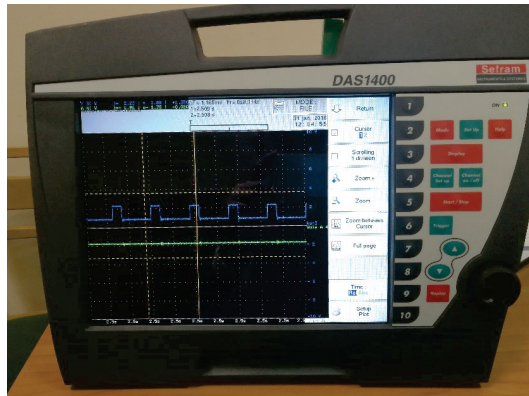


Fig. 3. Sefram DAS 1400 Data acquisition system

For further research, it is planned to use National Instruments NI9401 DAQ system, which allows to acquire data with sampling rate of 10 Mhz, from eight digital inputs. To use of this DAQ system, it is necessary to prepare a high efficient procedures, which handles data acquisition with such a high sampling rates. Because of complexity of such a procedures and selection of an appropriate concept, it hasn't been achieved yet.

5. Results

Figure 4 presents the results of pulse width measurements obtained for one side of the crankshaft. Each 360° contains 400 measurements.

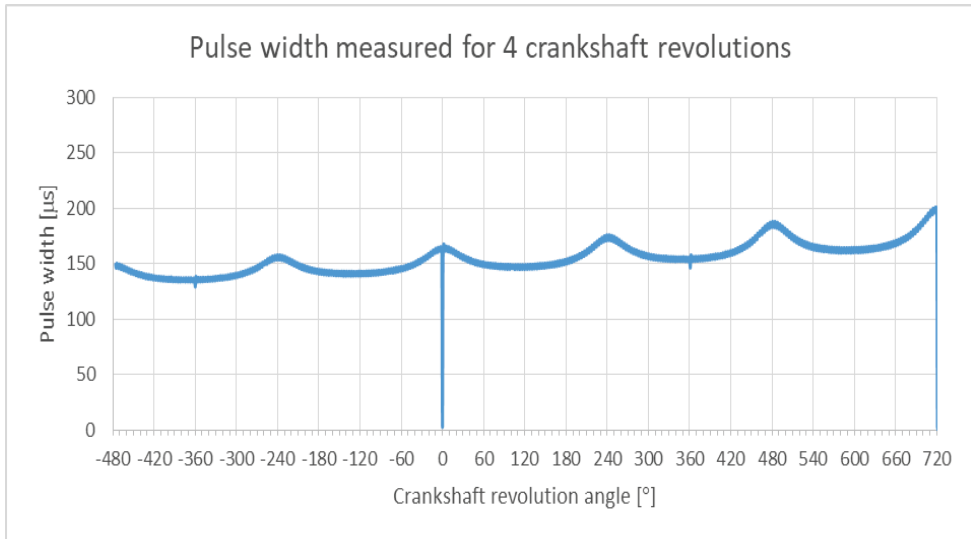


Fig. 4. Pulse width measured for 4 crankshaft revolutions

The following characteristic points can be read from the graph:

- 360° - piston of the first cylinder in TDC of the second part of the cycle; Reference point passed;
- 240° - forcing from the piston of the second cylinder;
- 0° - piston of the first cylinder in TDC of the second part of the cycle; Reference point passed;
- 240° - forcing from the piston of the third cylinder;
- 360° - piston of the first cylinder in TDC of the second part of the cycle; Reference point passed;
- 480° - forcing from the piston of the second cylinder;
- 720° - piston of the first cylinder in TDC of the second part of the cycle; Reference point passed.

The rising trend of the next impulses is related to operation of speed controller or the is the response to increasing the engine load. A longer pulse duration means a lower instantaneous rotational speed.

Figure 5 shows the detailed pulse widths for 0°.

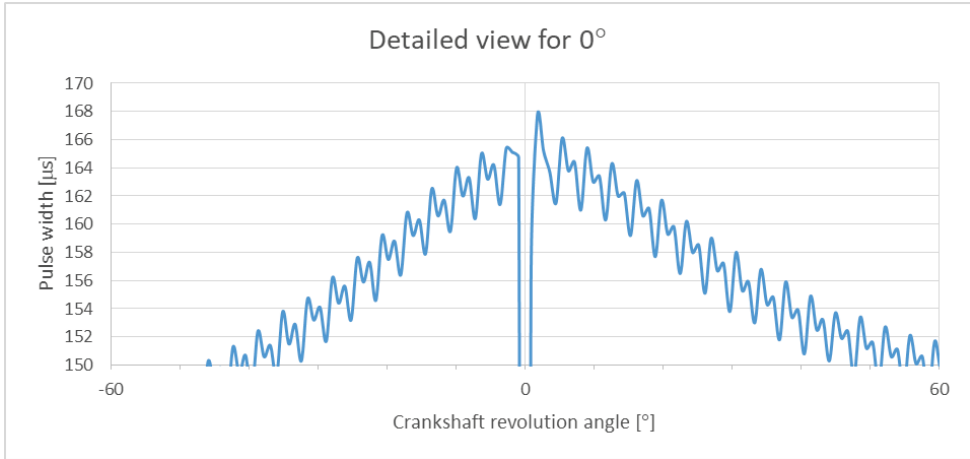


Fig. 5. Pulse widths at TDC

For angle of 0° a decrease in the pulse width is observed and it is caused by the compensation of the tooth width around this angle of rotation. Regular signal deformation before and after 0° might be related to encoder disc manufacturing accuracy or to another influences with 5kHz or higher frequency, which may come i.e. from gas forces.

All of the presented values refer to duration time of individual pulses. These times can be converted into instantaneous angular velocity, and also current angular position can be determined with high accuracy. Measurement of the current angular position, carried out simultaneously at both crankshaft ends, gives information about the temporary relative twisting of the crankshaft ends, so in fact, about torsional vibrations [3].

6. Conclusion

The aim of the presented preliminary research, was to assess the suitability of commercially available incremental encoders to measure the instantaneous engine speed. The analysis of the obtained graphs allows to precisely determine the moment of reaching the maximum combustion pressure in the cylinders, which coincides with the TDC of the pistons. Moreover, it was observed during these studies for the first time, that there are regular changes within each of the next four impulses, which may indicate low-amplitude and high-frequency excitations. In view of the presented observations, it can be recognized that with the aid of the presented equipment, the instantaneous engine speed can be determined and analyzed with great accuracy.

Additional analysis of measurements, carried out under conditions of simulated engine failure, will allow further determination of the suitability of the presented method to detect individual faults.

7. References

1. Barro R., Lee C.D., Kim S.H.: A Case Study of Thrust Variation Force Due to Coupled Torsional-Axial Vibration on Two Stroke Low Speed Diesel Engines. Conference Materials, 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017.
2. Dereszewski M., Charchalis A., Polanowski S.: Analysis of diagnostic utility of instantaneous angular speed of a sea going vessel propulsion shaft. *Journal of KONES*. Vol. 18. No 1. 2011.
3. Dereszewski M., Sikora G.: Processing of long lasting signals of torsional vibrations measured using incremental encoders. *Journal of Kones*, Vol. 25, No. 4, 2018.
4. Desbazeille M., Randall R.B., Guillet F., El Badaoui M., Hoisnard C.: Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft. *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, 2010.
5. Jianguo Yang, Lijun Pu, Zhihua Wang, Yichen Zhon, Xiping Yan: Fault detection in a diesel engine by analyzing the instantaneous angular speed. *Mechanical Systems and Signal Processing* 15(3), 2001.
6. Wierzcholski K., Miszczak A.: Electro-magneto-hydrodynamic lubrication. *Open Physics*, 16.1, 2018.
7. Xiang, L., Yang, S., Gan, C.: Torsional Vibration Measurements on Rotating Shaft System Using Laser Doppler Vibrometer. *Optics and Laser in Engineering*, 50, 2012.

DIAGNOSTYKA PRACY SILNIKÓW SPALINOWYCH PRZY POMOCY POMIARU CHWILOWEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WAŁU KORBOWEGO

1. Wprowadzenie

Morskie silniki wysokoprężne są szeroko stosowane na statkach jako silniki główne i pomocnicze, np. generatory prądowców. Większość z nich to silniki średnioobrotowe, z prędkością obrotową w przedziale od 90 do 800 obr./min. Ze względu na znaczenie tych mechanizmów na eksploatację i bezpieczeństwo statków oraz oczywisty fakt, że ich naprawa na pokładzie jest utrudniona przez nierówny stan morza i ograniczoną dostępność części zamiennych, zapewnienie niezawodności tych silników jest sprawą najwyższej wagi. Wyposażenie diagnostyczne pracy silników pomaga przewidzieć awarie i im przeciwdziałać.

Pomiar chwilowej prędkości obrotowej wału korbowego silników spalinowych jest w ostatnich latach dynamicznie rozwijającą się metodą diagnostyczną badania pracy silników spalinowych. Metodę tę rozwijają naukowcy z wielu krajów [1, 4, 5, 7], producenci silników, a także producenci tłumików drgań skrętnych. Pomiar chwilowej prędkości obrotowej odbywa się za pomocą jednego enkodera umieszczonego na jednym końcu wału korbowego. Natomiast pomiar drgań skrętnych w większości przypadków odbywa się za pomocą dwóch enkoderów umieszczonych po przeciwnych stronach wału korbowego.

Cele diagnostyczne nie są jedynym zastosowaniem informacji zawartych w chwilowej prędkości obrotowej silnika. Dokładny pomiar tej prędkości oraz predykcja wartości dla kolejnych obrotów wału korbowego może posłużyć do aktywnej optymalizacji procesu sterowania podsystemami silnika, np. regulatora prędkości obrotowej, zmiany dawki paliwa, zmiany charakterystyki pracy tłumików drgań skrętnych wypełnionych ferrocieczą [6].

Rodzaj enkoderów, aparatura do akwizycji danych, częstotliwość pomiaru oraz dalsza obróbka danych są elementami determinującymi wyniki poszczególnych badań. Założenia zaprezentowanej metody pomiaru chwilowej prędkości obrotowej są następujące:

- wysoka częstotliwość próbkowania danych,
- uniwersalny i łatwy montaż enkoderów na silniku,
- wykorzystanie ogólnodostępnych elementów automatyki i akwizycji danych,
- opracowanie algorytmów akwizycji danych oraz diagnostycznych, zapewniających aktywny monitoring.

2. Zasada pomiaru

Pomiary dokonywane za pomocą enkoderów inkrementalnych dotyczą zazwyczaj pozycji kątowej wału, zliczania zbroczy oraz szerokości impulsu. Enkodery inkrementalne dostępne w handlu dostarczają także zazwyczaj sygnał zerowy, w celu dokładnego odniesienia do kąta obrotu wału. W zastosowanych enkoderach, tarcze optyczne są podzielone na dwie współosiowe części, przesunięte wobec siebie o 90° . Każda z części podzielona jest na 100 impulsów, a jeden impuls składa się z równych części stanu wysokiego oraz niskiego. Jedynym wyjątkiem są impulsy w okolicach 0° , gdzie następuje kompensacja różnic geometrycznych. Z tych zależności geometrycznych wynika liczba zbroczy dla każdego z enkoderów, wynosząca 200 dla każdej z dwóch części tarczy enkodera, czyli 400 zbroczy na każdy enkoder. W rezultacie otrzymujemy impuls zbrocza co $0,9^\circ$.

Pomiar rozpoczyna się w dowolnym momencie pracy silnika, przy czym sygnał 0° odpowiada GMP pierwszego cylindra. Od chwili zainicjowania pomiaru, co $1\mu\text{s}$ (dla częstotliwości próbkowania 1 MHz) odpytywany jest stan binarny poszczególnych wyjść enkodera. Dla każdego enkodera odpytywany jest stan z trzech kanałów: A i B z dwóch części tarczy enkodera oraz Z, odpowiadający położeniu 0° . Po wykryciu zbrocza na którejkolwiek części tarczy enkodera następuje zsumowanie impulsów od poprzedniego zbrocza oraz wyzerowanie licznika. Należy jednak zaznaczyć, iż proces sumowania, zerowania licznika oraz zapisu danych odbywa się z udziałem procesora komputera.

Transfer oraz zapis danych dla częstotliwości próbkowania 1 MHz i 6 kanałów musi się odbywać z prędkością 6Mb/s. W związku z tak dużą ilością danych konieczne jest zastosowanie odpowiedniego oprogramowania oraz optymalizacja algorytmów pod kątem szybkiego zapisywania danych.

3. Obiekt badawczy

Główne dane silnika zostały przedstawione w tab. 1. Jest to turbodoładowany średnioobrotowy silnik zaprojektowany przez firmę Sulzer. Ten 3-cylindrowy, rzędowy silnik rozwija moc 408 kW przy prędkości obrotowej 750 obr./min. Silnik napędza generator prądu zmiennego GD8-500-50, 500kVA, podłączony do rozdzielni głównej. Obciążenie silnika można płynnie regulować, zmieniając obciążenie generatora (regulowany rezystor). Wysokociśnieniowy układ paliwowy jest wyposażony w trzy pompy wysokiego ciśnienia, po jednej na każdy cylinder. Widok ogólny silnika został zaprezentowany na rys. 1 [2].

Tabela 1

Podstawowe dane techniczne silnika

Producent	HCP Cegielski/Sulzer
Typ	3 AL 25/30
Moc (kW)	408
Ilość cylindrów	3
Pojemność silnika (cm ³)	4922
Prędkość obrotowa (obr./min.)	750
Stopień sprężania	13:1



Rys. 1. Widok ogólny silnika Sulzer 3 AL 25/30

4. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów:

- enkoderów inkrementalnych firmy Leine&Linde RHI 503, umieszczonych po przeciwnych stronach wału korbowego,
- rejestratora danych Sefram DAS1400 o częstotliwości próbkowania 1 MHz oraz docelowo rejestratora danych National Instruments NI 9401 o częstotliwości próbkowania 10 MHz,
- komputera klasy PC z oprogramowaniem Matlab oraz DAQmx.

Parametry enkoderów inkrementalnych zastosowanych na stanowisku pomiarowym (rys. 2) zawarto w tab. 2.

Tabela 2

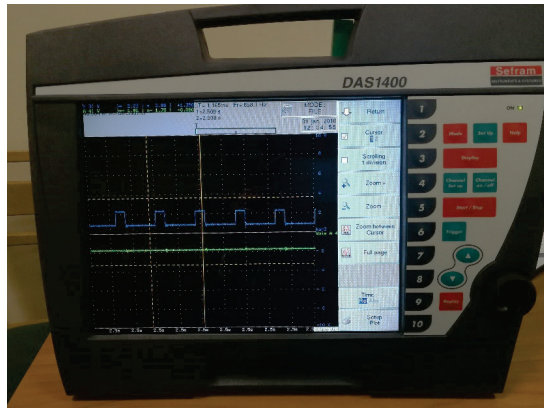
Dane enkoderów

Producent	Leine&Linde
Typ	RHI 503
Rozdzielczość	100 ppr
Błąd podziałowy	$\pm 50^\circ$ el
Separacja kanałów	$90 \pm 25^\circ$ el
Ilość kroków pomiarowych	4 x Line count
Sygnał wyjściowy	TTL
Częstotliwość sygnału wyjściowego (max)	300 kHz
Maksymalna dopuszczalna prędkość obrotowa	6000 rpm



Rys. 2. Przedni enkoder inkrementalny

Do badań wstępnych wykorzystano rejestrator Sefram DAS 1400 (rys. 3), umożliwiający akwizycję danych z częstotliwością 1Mhz. Akwizycja danych odbywa się z max. 16 kanałów cyfrowych, a zapis wstępny ze względu na wymaganą szybkość zapisu odbywa się w postaci binarnej w blokach pamięci ROM. Ze względu na dużą ilość zapisywanych danych, czas pomiaru jest ograniczony do 33,6 s. Po pomiarze, dane zapisywane są na dysku twardym rejestratora, po czym mogą zostać przetransferowane do komputera w celu dalszej obróbki.

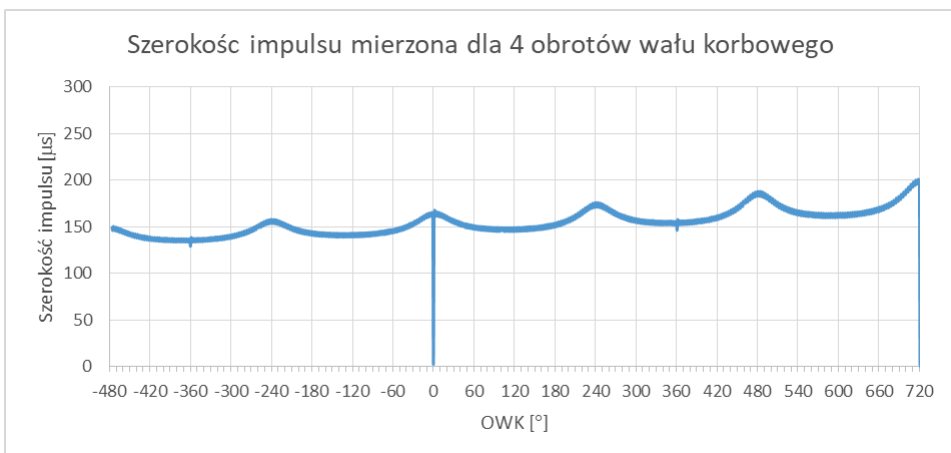


Rys. 3. System akwizycji danych Sefram DAS 1400

Planowane jest jeszcze wykorzystanie w dalszych badaniach rejestratora National Instruments NI9401, który umożliwia akwizycję danych z częstotliwością próbkowania 10 Mhz, z ośmiu wejść cyfrowych. Wykorzystanie tego rejestratora wiąże się jednak z koniecznością napisania bardzo wydajnego programu obsługującego akwizycję danych. Ze względu na złożoność takiego programu oraz dobór odpowiedniej koncepcji, nie udało się jeszcze tego zrealizować

5. Wyniki pomiarów

Na rys. 4 przedstawiono wyniki pomiarów szerokości pulsów uzyskanych dla jednej strony wału korbowego na opisywanym stanowisku badawczym.



Rys. 4. Szerokość impulsu zmierzona dla 4 obrotów wału korbowego

W kolejnych pozycjach wału korbowego, zarejestrowano następujące punkty charakterystyczne:

- 360° - tłok pierwszego cylindra w GMP drugiej części cyklu; przejście enkodera przez punkt referencyjny;
- 240° - wymuszenie od tłoka drugiego cylindra;
- 0° - tłok pierwszego cylindra w GMP, rozpoczęcie cyklu; przejście enkodera przez punkt referencyjny;
- 240° - wymuszenie od tłoka trzeciego cylindra;
- 360° - tłok pierwszego cylindra w GMP drugiej części cyklu; przejście enkodera przez punkt referencyjny;
- 480° - wymuszenie od tłoka drugiego cylindra;
- 720° - tłok pierwszego cylindra w GMP, rozpoczęcie cyklu; przejście enkodera przez punkt referencyjny.

Wzrostowa tendencja czasów kolejnych impulsów jest związana z pracą regulatora prędkości obrotowej lub zwiększeniem obciążenia silnika. Dłuższy czas trwania impulsu oznacza niższą chwilową prędkość obrotową.

Na rys. 5 pokazano szczegółowy przebieg szerokości pulsu dla 0°.



Rys. 5. Szerokość impulsów w GMP

Dla kąta 0° obserwowany jest spadek szerokości impulsu i jest on spowodowany kompensacją szerokości zębów w okolicy tego kąta obrotu. Sygnał przed oraz za kątem 0° jest w powtarzalny i może dotyczyć dokładności wykonania tarczy enkodera lub wynikać z dodatkowych wymuszeń, rzędu 5 kHz lub wyższych, pochodzących np. od sił gazowych.

Wszystkie z prezentowanych wartości dotyczą czasów przebiegu pojedynczych impulsów. Czasy te mogą zostać przeliczone na chwilową prędkość kątową, a także można z dużą dokładnością określać aktualną pozycję kątową. Pomiar aktualnej pozycji kątowej dokonywany jednocześnie na obu końcach wału korbowego daje informację o chwilowym względnym skręceniu końców wału korbowego, czyli drganiach skrętnych.

6. Wnioski

Celem przedstawionych badań wstępnych była ocena przydatności enkoderów inkrementalnych dostępnych w handlu do pomiaru chwilowej prędkości obrotowej silnika. Analiza otrzymanych wykresów pozwala na dokładne określenie chwili osiągnięcia maksymalnego ciśnienia spalania w cylindrach, które pokrywa się z GMP tłoka. Ponadto zaobserwowano regularne zmiany w obrębie wszystkich kolejnych czterech impulsów, co może świadczyć o niskoamplitudowych wymuszeniach o wysokiej częstotliwości. W związku z powyższym należy uznać, że za pomocą zaprezentowanej aparatury można z dużą dokładnością określać chwilową prędkość obrotową silnika i dokonywać jej analizy.

Dodatkowa analiza pomiarów przeprowadzonych w warunkach symulowanych niesprawności silnika pozwoli na dalsze określenie przydatności metody do wykrywania poszczególnych usterek.

7. Literatura

1. Barro R., Lee C.D., Kim S.H.: A Case Study of Thrust Variation Force Due to Coupled Torsional-Axial Vibration on Two Stroke Low Speed Diesel Engines. Conference Materials, 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017.
2. Dereszewski M., Charchalis A., Polanowski S.: Analysis of diagnostic utility of instantaneous angular speed of a sea going vessel propulsion shaft. Journal of KONES. Vol. 18. No 1. 2011.
3. Dereszewski M., Sikora G.: Processing of long lasting signals of torsional vibrations measured using incremental encoders. Journal of Kones, Vol. 25, No. 4, 2018.
4. Desbazeille M., Randall R.B., Guillet F., El Badaoui M., Hoisnard C.: Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft. Mechanical Systems and Signal Processing 24, 2010.
5. Jianguo Yang, Lijun Pu, Zhihua Wang, Yichen Zhon, Xinping Yan: Fault detection in a diesel engine by analyzing the instantaneous angular speed. Mechanical Systems and Signal Processing 15(3), 2001.
6. Wierzcholski K., Mischczak A.: Electro-magneto-hydrodynamic lubrication. Open Physics, 16.1, 2018.
7. Xiang, L., Yang, S., Gan, C.: Torsional Vibration Measurements on Rotating Shaft System Using Laser Doppler Vibrometer. Optics and Laser in Engineering, 50, 2012.

