

Jacek DYBAŁA
Tomasz MYDŁOWSKI
Artur MAŁECKI
Krzysztof BOGDZIŃSKI

PTNSS–2015–3505

Dynamometer and test stand for low power internal combustion engine

This paper presents the design and implementation of compact engine dynamometer. The design intent, the torque measuring system, the signal processing system, and the data acquisition system were done with NI LabVIEW. On the test bench was mounted Honda NHX 110 engine - single cylinder, four-stroke, liquid-cooled.

Key words: dynamometer, engine dynamometer, engine test stand, LabVIEW environment

Stanowisko hamowniane do badań silników spalinowych o małych mocach

W niniejszym artykule przedstawiono konstrukcję wykonanej od podstaw kompaktowej hamowni silnikowej. Przedstawione zostały założenia konstrukcyjne, sposób dokonywania pomiaru momentu obrotowego, układ przetwarzania sygnału, a także metoda akwizycji danych pomiarowych wykonana za pomocą środowiska LabVIEW. Na stanowisku hamownianym zamontowano jednocylindrowy, czterokusowy, chłodzony cieczą silnik ZI HONDA NHX 110.

Słowa kluczowe: stanowisko hamowniane, hamownia silnikowa, badania stanowiskowe silników, środowisko LabVIEW

1. Wstęp

W celu przeprowadzenia badań silnika spalinowego w warunkach laboratoryjnych, niezbędne jest wykorzystanie stanowiska hamownianego. Stanowisko tego typu umożliwia zadawanie wybranego obciążenia, czyli odbierania momentu obrotowego z wału korbowego silnika. Ponadto umożliwia niezbędny ciągły pomiar, generowanego przez silnik, momentu obrotowego.

W związku z realizowanymi badaniami dotyczącymi wpływu czynników środowiskowych i zanieczyszczeń biopaliw na efektywność energetyczną silników spalania wewnętrznego, prowadzonymi w posiadanej komorze klimatycznej, zaistniała potrzeba zaprojektowania i wykonania kompaktowego stanowiska hamowni silnikowej.

Wykorzystanie gotowego, dostępnego na rynku stanowiska, było niemożliwe ze względu na stawiane wymagania związane z pracą wewnątrz komory klimatycznej, takie jak: małe rozmiary, niska masa, niska emisja ciepła oraz odporność zróżnicowane warunki klimatyczne.

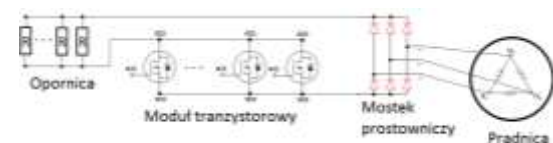
W niniejszym artykule przedstawiono główne założenia konstrukcyjne omawianego stanowiska oraz opisano jego poszczególne elementy składowe.

2. Hamulec elektryczny

Urządzeniem odbierającym moment obrotowy w omawianym stanowisku hamownianym jest synchroniczny silnik elektryczny BLDC z magnesami stałymi pracujący jako prądnica. Zdecydowano się na taki odbiornik momentu obrotowego ponieważ zastosowanie hamulca elektrowirowego, po-

wszechnie stosowanego we współczesnych hamowniach spowodowałoby konieczność odprowadzenia dodatkowej ilości ciepła z komory klimatycznej, co uniemożliwiłoby przeprowadzanie badań w ustalonych warunkach klimatycznych (stała temperatura i wilgotność).

W obecnej konfiguracji, praca mechaniczna zamieniana jest na energię elektryczną z wysoką sprawnością (co oznacza małą emisję ciepła), energia elektryczna jest natomiast rozpraszana (zamieniana w ciepło) na zewnątrz komory na specjalnej, zbudowanej na potrzeby stanowiska, opornicy. Obieranie mocy elektrycznej realizowane jest zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1



Rys. 1. Schemat odbierania mocy elektrycznej.

Takie rozwiązanie odbierania mocy elektrycznej daje duże możliwości sterowania przepływającym prądem, co bezpośrednio przekłada się na odbierany moment obrotowy. Do wykonania układu przedstawionego na rys. 1 wykorzystano następujące elementy:

- Mostek prostowniczy trójfazowy o parametrach: maksymalne napięcie 400V, maksymalny prąd 300A
- Moduł tranzystorowy zaprojektowany i wykonany na potrzeby budowy stanowiska.

- Opornica o rezystancji 0,05Ω. Rezystancja ta podcytkowana była parametrami prądnicy. Niewielkie i zależne od prędkości obrotowej napięcie wyjściowe z prądnicy wymusiło stosunkowo niską rezystancję, aby możliwe było obciążenie silnika momentem znamionowym w pełnym zakresie prędkości obrotowej (co jest konieczne do sporządzenia charakterystyki zewnętrznej badanego silnika spalinowego). Żądana rezystancja została uzyskana poprzez połączenie równolegle rezystorów wykonanych z drutu stalowego. Ponadto, z uwagi na znaczny wzrost rezystancji związany ze wzrostem jej temperatury, konieczne okazało się chłodzenie opornicy wodą.

- Silnik BLDC o deklarowanych przez producenta parametrach[1]:

- rezystancja: 0,0004 Ω,
- zalecany sterownik o prądzie co najmniej 250 A,
- napięcie zasilania 30-70 V,
- prędkość obrotowa 150obr.min na każdy 1V napięcia zasilania, maksymalna prędkość obrotowa odpowiadająca maksymalnemu napięciu zasilania wynosi 10500 obr./min,
- masa: 2730 g,
- średnica wałka: 10 mm,
- pobór prądu nieobciążonego silnika 13A przy zasilaniu 20V,
- Wymiary 150x120x118mm,
- Ekwiwalent silnika spalinowego o mocy 20KM.

Sterowanie modulem tranzystorowym realizuje sterownik mikroprocesorowy, który został zaprojektowany, wykonany i oprogramowany na potrzeby budowanego stanowiska. Sterownik ten umożliwia utrzymywanie stałej, dowolnie zaprogramowanej prędkości obrotowej badanego silnika, niezależnie od jego momentu obrotowego. Zmiana obciążenia badanego silnika ZI odbywa się poprzez zmianę kąta otwarcia przepustnicy. Sterownik umożliwia też realizację dowolnie zaprogramowanego cyklu badawczego, zapewniając tym samym możliwości nie ustępujące dostępnym na rynku hamownikom silnikowym renomowanych firm.

Od strony mechanicznej wykonano ramę hamowni, połączono wał korbowy silnika spalinowego z wałem silnika elektrycznego oraz zapewniono możliwość pomiaru momentu obrotowego. Układ pomiarowy momentu obrotowego opisano w kolejnej części niniejszej pracy. Do przeniesienia momentu obrotowego z wału silnika spalinowego do prądnicy wykorzystano przekładnię pasową o przełożeniu 1:1 wykorzystującą zębaty pas zbrojony.

3. Pomiar kąta obrotu wału korbowego

Do pomiaru kąta obrotu wału korbowego silnika spalinowego wykorzystano enkoder Kubler Sendix 8.5853.1274.G423 (rys. 2), optyczny, jednoobroto-

wy, absolutny oraz inkrementalny, o następujących parametrach [2]:

- enkoder absolutny: rozdzielczość 14 bit, transmisja danych SSI w kodzie Graya w zakresie częstotliwości 50 kHz - 2 MHz, monoflop time 15 μs
- enkoder inkrementalny: rozdzielczość 2048 ppr (punktów na obrót), maksymalna częstotliwość 400 kHz
- Kanały wejścia/wyjścia 5 V DC, zgodne z RS422, kompatybilne z układami TTL.
- Zasilanie 5 V DC, maksymalny pobór prądu 70 mA



Rys. 2. Enkoder Kubler Sendix 8.5835.1274.G423 zamontowany na czopie wału korbowego silnika spalinowego.

Jako urządzenie master wykorzystano sprzęt marki National Instruments: kontroler NI cRIO 9024 z kartą cyfrowego wejścia/wyjścia NI 9401 (rys. 3). Parametry karty [3]:

- 8 kanałów cyfrowych wejścia/wyjścia, możliwość pracy w trybach 8 wejść, 8 wyjść lub 4 wejścia i 4 wyjścia,
- Napięcie kanałów 0-5 V, technologia TTL,
- Maksymalna częstotliwość odświeżania wejść i wyjść: 10 MHz (100 ns),
- Złącze D-SUB 25 pin, standard przemysłowy



Rys. 3. Kontroler NI cRIO 9014 z kartą cyfrowych wejść/wyjść NI 9401

Całkowita długość pojedynczej transmisji połączenia kąтового enkodera wynosi[4]:

$$T_{total} = n * T + \frac{1}{2}T + t_m$$

Zastosowany enkoder może pracować z maksymalną częstotliwością sygnału zegarowego

(CLK) równą 2 MHz, co oznacza, że pojedynczy cykl zegara trwa $T = 0,5 \mu\text{s}$. Minimalny czas resetu rejestru enkodera (monoflop time) wynosi $t_m = 20 \mu\text{s}$. Długość słowa $n = 14$ bitów. Całkowity czas transmisji położenia kąтового wynosi $T_{total} = 27,25 \mu\text{s}$. Oznacza to, że pomiar położenia kąowego z enkodera absolutnego mógłby się odbywać z maksymalną częstotliwością 36,7 kHz.

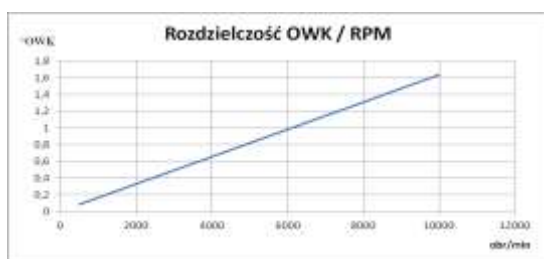
Enkoder o słowie długości 14 bitów może odczytać położenie kątowe z dokładnością wynoszącą:

$$\frac{360^\circ}{2^{14}} \approx 0,02^\circ$$

Maksymalna częstotliwość pomiaru ma bezpośredni wpływ na poziom dyskretyzacji pomiaru. Poziomą dokładność pomiaru w funkcji prędkości obrotowej silnika (RPM , obr/min) wyznacza się ze wzoru:

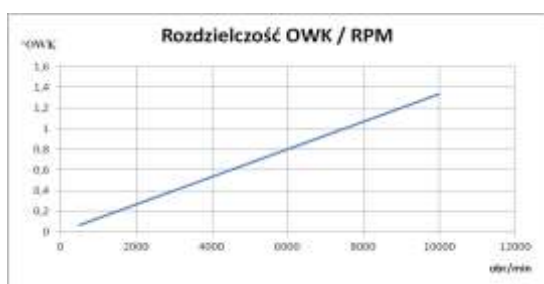
$$\frac{360^\circ * T_{total} * RPM}{60}$$

Wartość ta jest wyrażona w stopniach obrotu wału korbowego ($^\circ\text{OWK}$). Dla badanego przypadku charakterystyka ta przyjmuje następujący przebieg (rys. 4):



Rys. 4. Wykres rozdzielczości pomiaru enkodera absolutnego w $^\circ\text{OWK}$ w zależności od prędkości obrotowej silnika. Monoflop time = 20 μs .

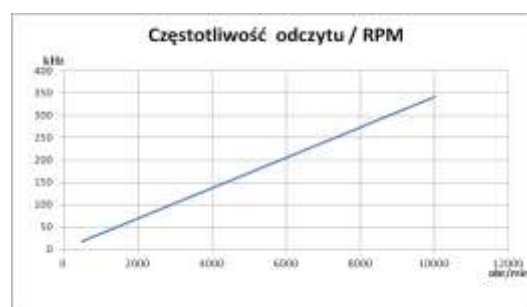
Według danych producenta enkodera, czas resetu rejestru (monoflop time) wynosi tylko 15 μs . Potwierdzenie tej wartości w testach praktycznych umożliwiło wzrost częstotliwości odczytu do 44,9 kHz ($T_{total} = 22,25 \mu\text{s}$) oraz poprawę rozdzielczości (rys. 5).



Rys. 5. Wykres rozdzielczości pomiaru enkodera absolutnego w $^\circ\text{OWK}$ w zależności od prędkości obrotowej silnika Monoflop time = 20 μs .

Rozdzielczość odczytu przekracza $0,5^\circ$ OWK przy 3800 obr/min. 1° OWK przekraczany jest powyżej 7500 obr/min. Dla zachowania dokładności pomiaru przy wyższych prędkościach obrotowych możliwe jest wykorzystanie enkodera inkre-

mentalnego, zawartego w enkoderze Kubler. Przy rozdzielczości 2048 ppr (dokładność $0,17^\circ$) zależność częstotliwości odczytu od prędkości obrotowej wału prezentuje się następująco (rys. 6):

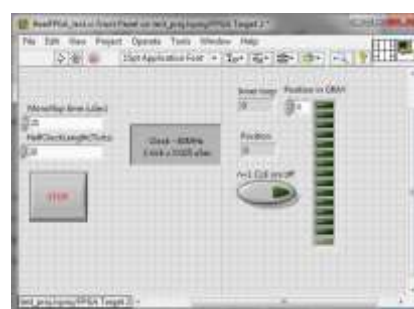


Rys. 6. Wykres częstotliwości odczytu w zależności od prędkości obrotowej silnika dla enkodera inkrementalnego.

Jak wynika z wykresu, nawet przy prędkościach obrotowej równej 10000 obr/min maksymalna częstotliwość enkodera (400 kHz) nie zostanie osiągnięta.

Program obsługujący transmisję danych SSI [5] opracowano w środowisku NI LabVIEW. Generuje on zgodny ze standardem SSI różnicowy sygnał zegarowy (CLK+, CLK-) w trakcie którego pobiera kolejne bity danych z kanału DATA+, po czym następuje czasowe oczekiwanie na reset rejestru danych w enkoderze (monoflop time). Program wykonywany jest przez taktowany zegarem 40 MHz układ FPGA obecny w sterowniku cRIO.

Program ustawiony jest na odbiór 14 bitów danych. Czas oczekiwania na reset rejestru enkodera (monoflop time) można zmieniać z dokładnością do 1 μs . Częstotliwość sygnału zegarowego CLK reguluje się zmieniając czas połowy okresu cyklu zegara z dokładnością do 0,025 ns (HalfClockLength, dokładność wyniku z częstotliwości taktowania układu FPGA kontrolera - 40 MHz) (rys. 7).



Rys. 7. Panel czołowy programu obsługi połączenia SSI

4. Wykres indykatorowy

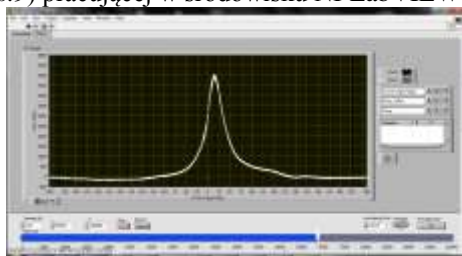
Do sporządzenia wykresu indykatorowego niezbędna jest ciągła informacja o ciśnieniu panującym w komorze spalania silnika i odpowiadającym mu położeniu kątowemu wału korbowego silnika. Sposób pomiaru położenia kąowego opisano

w poprzednim punkcie, natomiast do pomiaru ciśnienia w cylindrze silnika wykorzystano układ pomiarowy Oprtrand PSIplug (rys. 8). W skład tego zestawu wchodzi światłowodowy czujnik ciśnienia, przewód światłowodowy, przetwornik sygnału oraz specjalnie spreparowana świeca zapłonowa przystosowana do montażu czujnika ciśnienia.



Rys. 8. Zestaw do pomiaru ciśnienie w cylindrze Oprtrand PSIplug

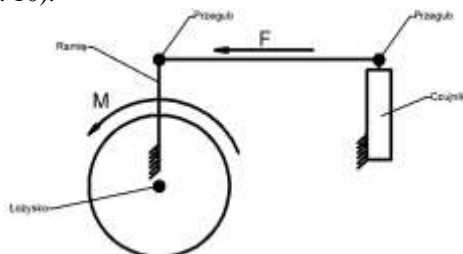
Wchodzący w skład zestawu przetwornik sygnału wyposażony jest w wyjście analogowe (0,5-4,5V). Sygnał ten rejestrowany jest przy użyciu karty pomiarowej NI 9206. Za synchroniczną rejestrację wartości ciśnienia oraz odpowiadającym im położenia kątowne wału korbowego silnika odpowiada uprzednio omawiany kontroler NI cRIO 9024. Sporządzanie wykresów indykatorowych oraz zapis zarejestrowanych danych odbywa się przy użyciu stworzonej w tym celu aplikacji (Rys.9) pracującej w środowisku NI LabVIEW.



Rys. 9. Aplikacja generująca wykresy indykatorowe.

5. Pomiar siły i momentu obrotowego

W celu odczytu aktualnej wartości i rejestracji momentu obrotowego, opracowano oparty na tensometrycznym czujniku siły układ pomiarowy (rys. 10).



Rys. 10 Schemat idei pomiaru momentu obrotowego

Silnik BLDC pracujący jako prądnica obierająca moment obrotowy przykręcona jest do obrótowej tarczy zamocowanej do ramy stanowiska poprzez łożysko kulkowe dwurzędowe skośne. Możliwość obrotu tarczy jest zablokowana poprzez ramię

o długości 250mm połączone z tensometrycznym czujnikiem siły (Zemic L6N) poprzez drążek zakończony po obydwu stronach przegubami kulistymi. Moment obrotowy obliczany jest jako iloczyn długości ramienia i siły zmierzonej przez czujnik.

Sygnał z tensometrycznego czujnika siły przechwytywany jest za pomocą karty pomiarowej NI 9237, która zapewnia również zasilanie tego czujnika (10V). Podgląd i rejestracja odbywa się również środowiska NI LabVIEW. Pomimo, że producent czujnika deklaruje, że jest on w pełni skompensowany termicznie, to podczas kalibracji stwierdzono nieznaczne wahania sygnału dla zakresu temperatur od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$ (zadawanych wewnątrz komory klimatycznej). Wprowadzono zatem dodatkową wartość korekcji termicznej niezależnej od obciążenia mostka tensometrycznego (gdyż wahania sygnału były niemalże identyczne czujnika nie obciążonego żadną siłą jak i dla czujnika obciążonego maksymalną siłą).

6. Rejestracja pozostałych parametrów

Badany na stanowisku hamownianym silnik spalinowy Honda NHX110 wyposażono w programowalny sterownik zarządzający pracą silnika polskiej produkcji ECU-Master EMU[6] (rys. 11).



Rys. 11. Sterownik silnika EMU firmy ECU Master.

Omawiany sterownik umożliwił zadawanie dowolnych parametrów sterowania, takich jak: dawka paliwa i współczynnik nadmiaru powietrza (możliwość pracy w otwartej i zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego z szerokopasmową sondą lambda), kąt wyprzedzenia zapłonu, czas ładowania cewki zapłonowej, prędkość obrotowa biegu jałowego.

Sterownik ten posiada również możliwość komunikowania się poprzez magistralę CAN. Dzięki temu nie było konieczności duplikowania czujników na potrzeby sterowania pracą silnika i rejestracji parametrów pracy silnika, których dotyczą prowadzone badania. Ze sterownika silnika poprzez sieć CAN wysyłane są wszelkie niezbędne odczyty z czujników silnika oraz zadane parametry sterowania do zespołu aparatury pomiarowej opartej o kartę NI 9853 z oprogramowaniem wykonanym w środowisku NI LabVIEW. Parametry które sterownik silnika wysyła przez magistralę CAN to:

- prędkość obrotowa silnika,

- ciśnienie w kolektorze dolotowym,
- kąt otwarcia przepustnicy,
- temperatura powietrza dolotowego,
- temperatura cieczy chłodzącej,
- współczynnik nadmiaru powietrza λ ,
- dawka paliwa (czas wysterowania wtryskiwacza),
- kąt wyprzedzenia zapłonu,
- napięcie w instalacji elektrycznej (napięcie akumulatora),
- temperatura gazów wylotowych
- wilgotność powietrza dolotowego

Co ważne, informacje te wysyłane są w czasie rzeczywistym oraz są skorelowane z pozostałymi odczytami z układu pomiarowego takimi jak moment obrotowy silnika, ciśnienie indykowane i z

enkoderem mierzącym położenie i prędkość obrotową wału korbowego.

Taki zestaw danych pozwala na dokładną analizę wyników badań.

7. Podsumowanie

W niniejszym artykule opisano główne założenia konstrukcyjne stanowiska hamownianego oraz opisano jego poszczególne elementy składowe. Wykonane stanowisko wykorzystywane jest do pomiarów wpływu czynników środowiskowych oraz zanieczyszczeń biopaliw na efektywność energetyczną silników ZI. W niedalekiej przyszłości, dzięki modułowej budowie stanowiska planowane jest dokonanie rozbudowy o aparaturę mierzącą aktywność wibroakustyczną badanego silnika spalinowego.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

BLDC BrushLess Direct-Current motor/*silnik bezszczotkowy*
 CAN Controller Area Network/*szeregowa magistrala komunikacyjna*

SSI Synchronous Serial Interface/*protokół szeregowy, synchronizowanej transmisji danych.*

Bibliography/Literatura

- [1] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__17400__Scorpion_III_50_520_Brushless_Outrunner_Motor.html. Dostęp: maj 2015
- [2] Fritz Kübler GmbH, *Karta danych: 5853 / 5873*, luty 2015, w: https://www.kuebler.com/k2014/j/pl/produkte/details/drehgeber/Absolut_Singleturn/Welle/optisch/Standard/5853. Dostęp: luty 2015
- [3] National Instruments., *NI 9401 5 V/TTL, Bidirectional Digital I/O, 8 Ch Module Data Sheet*, listopad 2014, w: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-86>. Dostęp: luty 2015
- [4] *Elektroniczne techniki pomiarowe: Elektroniczne systemy pomiaru kątów*, w: http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/automatyka/c_elektroniczna_tech_n_pomiarowa/w16.htm#dyn, Dostęp: luty 2015
- [5] POSISTAL FRABA, *Implementation of SSI Master Interface Application Note*, sierpień 2013, w: https://www.posital.com/media/posital_media/documents/AbsoluteEncoders_Context_Technology_SSI_AppNote.pdf. Dostęp: luty 2015
- [6] <http://www.ecumaster.pl/produkty/ecumaster-emu> Dostęp: maj 2015

Mr Dybała Jacek, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering at Warsaw University of Technology.

Dr hab. inż. Jacek Dybała – profesor na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.



Mr Mydlowski Tomasz, DEng. – PHD student in the Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering at Warsaw University of Technology.

Mgr inż. Tomasz Mydlowski – doktorant na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.



Mr Małecki Artur, DEng. – PHD student in the Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering at Warsaw University of Technology.

Mgr inż. Artur Małecki – doktorant na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.



Mr Bogdziński Krzysztof, Eng. – student in the Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering at Warsaw University of Technology.

Inż. Krzysztof Bogdziński – student na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.