



STANOWISKO DO BADANIA WTRYSKIWACZY W WARUNKACH ZASILANIA SILNIKA PALIWAMI MODYFIKOWANYMI

Jacek Rudnicki

Norbert Ochal

Politechnika Gdańska
Ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Polska
Tel.: +48 58 3472773, fax: +48 58 3472430
e-mail: jacekrud@pg.edu.pl

Abstract

Od 2015 roku w Katedrze Siłowni Morskich i Lądowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej realizowane są badania naukowe związane z kompleksowym badaniem silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego różnymi rodzajami pozostałościowych paliw żeglugowym, w tym zasiarczonych i modyfikowanych. Przewidywanym efektem tych badań, dofinansowanych przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku, ma być opracowana metodyka oceny energetycznej nowo produkowanych paliw żeglugowych oraz oceny skutków zastosowania tych paliw na intensywność degradacji elementów konstrukcyjnych silnika okrętowego [1, 2, 3, 4, 5]. Ocena taka wymaga min. analizy porównawczej charakterystyk przepływowych wtryskiwacza w stanie referencyjnym (zwykle nowego) oraz po przepracowaniu przez rozpylacz określonej liczby godzin w warunkach zasilania silnika badanymi paliwami.

W referacie przedstawiono założenia oraz ich sprzętową realizację stanowiska do badania wtryskiwaczy a także wyniki badań wstępnych, których celem była ocena przydatności realizowanego stanowiska.

Keywords: paliwa pozostałościowe, indykowanie silnika, analiza porównawcza

1. Wprowadzenie

Zmienność i duże wahania cen paliw w transporcie (przykładowo - na rys. 1.1 przedstawiono zmiany średniej ceny detalicznej oleju napędowego na stacjach paliw w Polsce w latach 2006 – 2018), zaostrzające się wymagania proekologiczne dotyczące wszystkich gałęzi przemysłu, w tym również transportu morskiego [8] a także konkurencja na rynku paliw powodują swego rodzaju zmianę filozofii dotyczącej oceny jakości paliw, czego

najlepszym przykładem może być chociażby najnowsza edycja normy ISO 8217 (ISO 8217:2017 Sixth edition [7]), w której wprowadzono nowe, standardowe rodzaje paliw o oznaczeniach: DFA, DFZ i DFB, charakteryzujące się zawartością estru metylowego kwasu tłuszczowego (FAME) maksymalnie do 7% objętości paliwa, przy czym należy zauważyć, że do czasu publikacji wspomnianej normy FAME był uznawany za zanieczyszczenie we wszystkich paliwach okrętowych.



Rys. 1.1 Średnia cena detaliczna oleju napędowego na stacjach paliw w Polsce w latach 2006 – 2018. (źródło: <https://www.bankier.pl/gospodarka/wskazniki-makroekonomiczne/on-pol>)

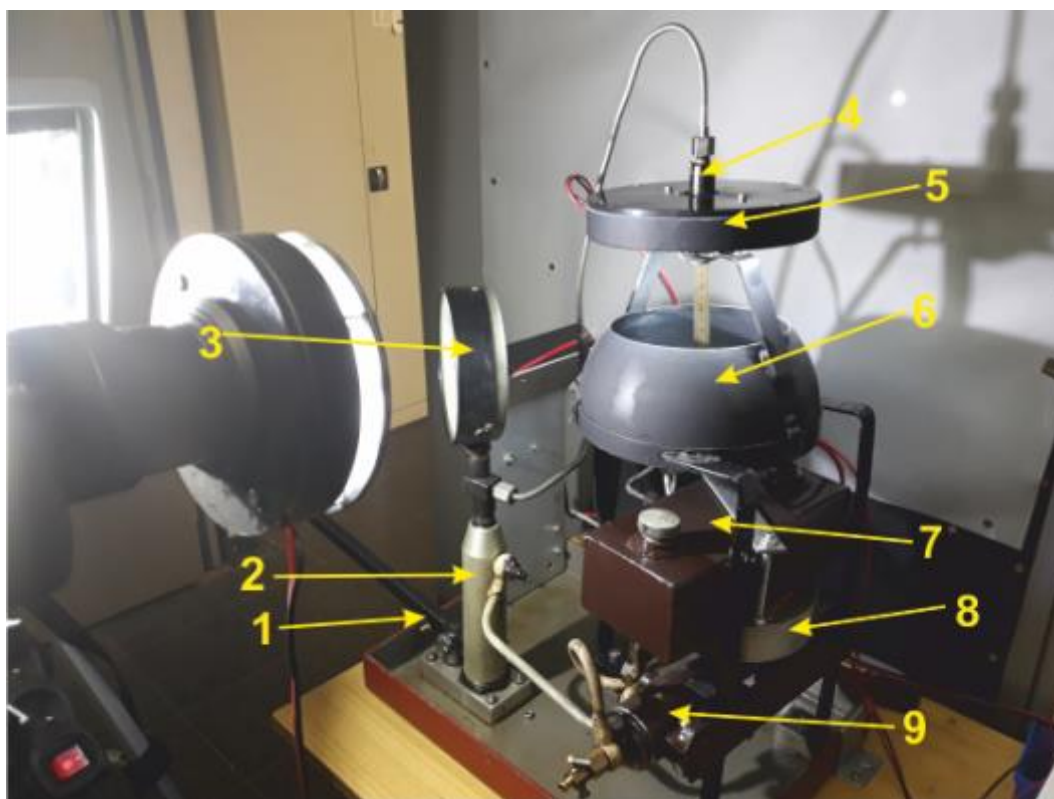
Można zatem pokusić się o stwierdzenie, że w nadchodzących latach pojawiać się będzie coraz więcej nowego rodzaju paliw i dodatków do nich, wprowadzanych również na rynek paliw żeglugowych. Akceptacja i uznanie dopuszczalności stosowania tego rodzaju nowości wymaga zawsze etapu badań wstępnych w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych prowadzonych w różnych aspektach. Jednymi z ważniejszych są aspekty trwałościowo – niezawodnościowe gdyż jest sytuacją oczywistą, że istnieje konieczność oceny wpływu różnego rodzaju modyfikowanych paliw na trwałość podstawowych węzłów silnika.

Ze względu na duży popyt na usługi tego rodzaju, w szczególności dotyczące tzw. „paliw ciężkich” w Katedrze Siłowni Morskich i Lądowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, w wyniku prowadzonych badań wykonano projekt oraz prototyp instalacji paliwowej silnika laboratoryjnego, która umożliwia etapowe, w pełni zautomatyzowane podgrzewanie i oczyszczanie (statyczne i dynamiczne) ciężkiego paliwa pozostałościowego przed podaniem do silnika, a także przełączanie zasilania silnika z paliwa destylacyjnego na pozostałościowe i odwrotnie. Kompletna realizacja zakładanych celów badawczych, wymagała również opracowania i realizacji sprzętowej projektu stanowiska do analizy porównawczej charakterystyk przepływowych wtryskiwacza w stanie referencyjnym (zwykle nowego), oraz po przepracowaniu przez rozpylacz określonej liczby godzin w warunkach zasilania silnika badanymi paliwami.

2. Podstawowe założenia projektowe

Bazując na typowej, powszechnie spotykanej w warsztatach remontowych, konstrukcji stanowiska do badania wtryskiwaczy (rys. 2.1.) przeprowadzono kilka cykli badań wstępnych

mających na celu opracowanie listy koniecznych modyfikacji i zmian w docelowej wersji stanowiska.



Rys. 2.1. Widok bazowej, wyjściowej wersji stanowiska do badania wtryskiwaczy
1 – dźwignia ręczna pompy, 2 – pompa ręczna próbnika, 3 – manometr, 4 – wtryskiwacz, 5 – oświetlenie wtryskiwacza, 6 – zbiornik odpływowy, 7 – zbiornik paliwa, 8 – płyta grzewcza, 9 – filtr paliwa

Doświadczenie zdobyte w czasie tych badań pozwoliło na sformułowanie zasadniczych założeń projektowych, do których zaliczyć można:

- konieczność realizacji elektromechanicznego układu napędu sekcji tłoczącej pompy - w odniesieniu do stanowiska z pompą paliwa napędzaną za pomocą ręcznej dźwigni, gdzie uzyskanie powtarzalności pomiaru było znikome, postulat powtarzalności warunków pomiarów stał się jednym z najważniejszych do zrealizowania;
- konieczność realizacji układu regulacji:
 - temperatury paliwa,
 - prędkości obrotowej wału napędowego sekcji tłoczącej,
 - położenia listwy paliwowej;
- konieczność realizacji odpowiedniego (głównie w zakresie prawidłowego doświetlenia i kontrastu tła) układu ekspozycji strugi rozpylanego paliwa w celu rejestracji video procesu w trybie „ultra – slow motion” tzn. z prędkością ok. 1000 klatek/s
- konieczność realizacji układu akwizycji wybranych danych za pomocą komputerowej karty pomiarowej – założenie to wymagało opracowania koncepcji zastosowania niezbędnych przetworników umożliwiających pomiar i rejestrację wyniku przynajmniej:

- zmian ciśnienia w przewodzie wtryskowym (w tym ciśnienia otwarcia wtryskiwacza)
- prędkości obrotowej wału napędowego pompy,
- położenia listwy paliwowej sekcji tłoczącej,
- wydatku masowego sekcji tłoczącej,
- temperatury wtryskiwanego paliwa.

3. Opis stanowiska

Przedstawione w rozdz. 2 założenia pozwoliły na opracowanie projektu i budowę przedmiotowego stanowiska, które w wariantcie testowym „α” przedstawione jest na Rys. 3.1.



Rys. 3.1. Widok stanowiska do badania strugi rozpylanego paliwa. 1 – przemiennik częstotliwości (falownik), 2 – elektromechaniczny układ napędowy pompy wtryskowej, 3 – pompa wtryskowa z armaturą i przetwornikami ciśnienia, 4 – zbiornik zapasowy paliwa z układem podgrzewania, 5 – wtryskiwacz umieszczony na zbiorniku pomiarowym, 6 – układ rejestracji fotograficznej (źródło światła LED + aparat Sony RX 10III.)

Podstawowe bloki (moduły) funkcjonalne stanowiska to:

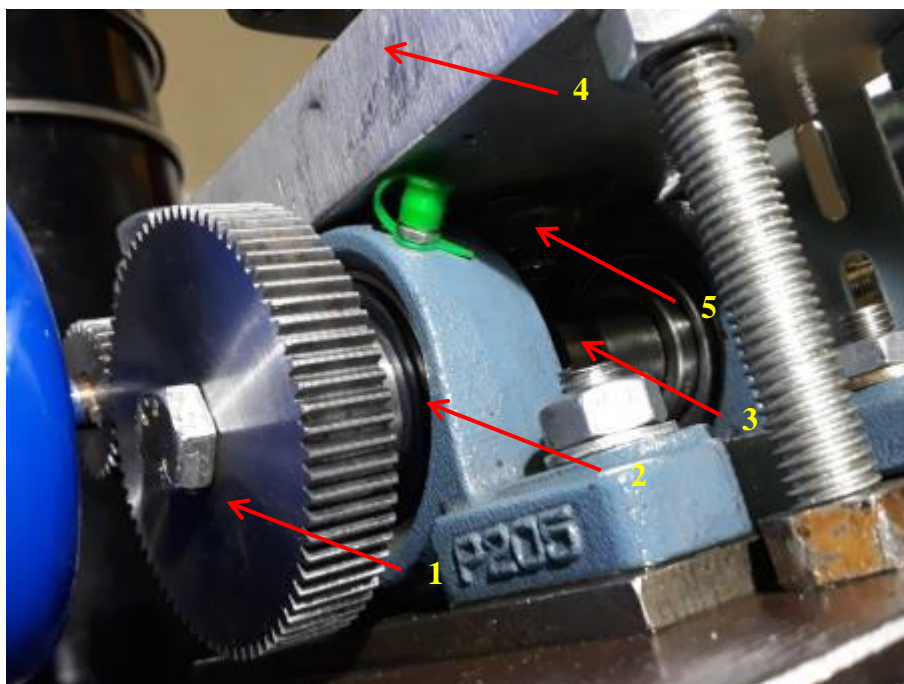
- Elektromechaniczny układ napędowy sekcji tłoczącej pompy wtryskowej

W celu zapewnienia powtarzalności warunków badań na stanowisku do testowania wtryskiwaczy paliwa, zastosowano jednostopniową pompę paliwową typu Bosch PFR1K65A332/11 (tzw. pompa wgłębiana o średnicy tłoczka 7 mm, lewoskrętna, zamontowana z zachowaniem wymiaru kontrolnego, wybitego na jej korpusie wynoszącego w konkretnym przypadku $82,8 \pm 0,2$ mm). Jako napęd pompy zastosowano silnik trójfazowy o mocy 750 W, zasilany z sieci jednofazowej za pomocą przemiennika częstotliwości umożliwiającego regulację prędkości obrotowej wału napędowego. Wał ten napędzany jest od silnika za pośrednictwem zespołu kół zębatych o przełożeniu 2:1. Krzywka napędowa wału

współpracuje bezpośrednio z popychaczem nurnika pompy. Całość przedstawiona jest na rys. 3.2 – 3.3.



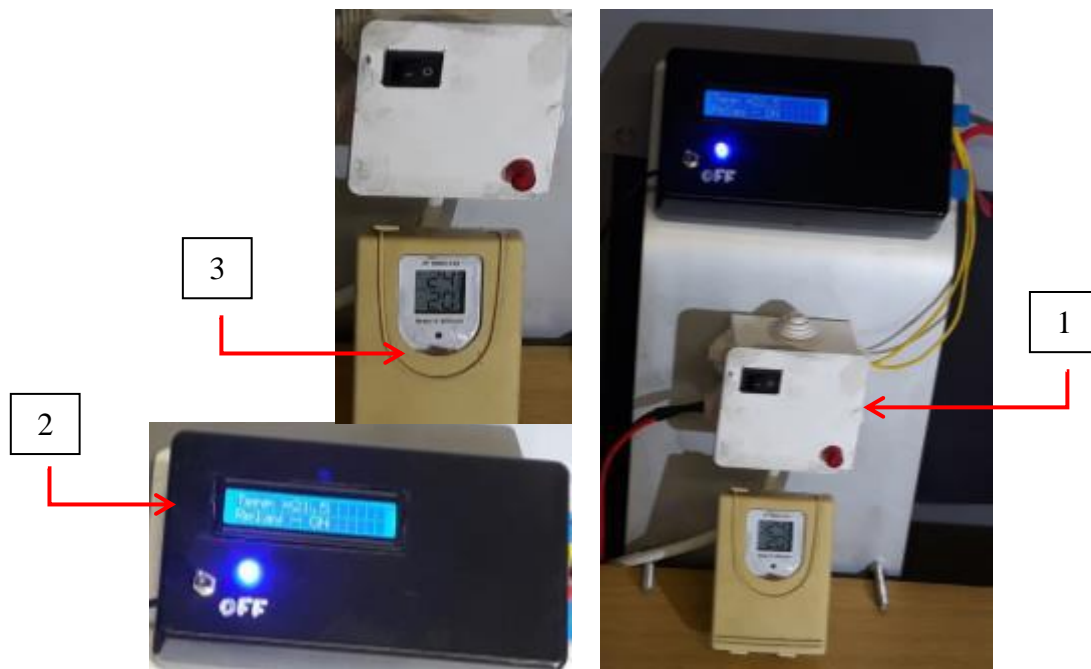
Rys. 3.2. Widok układu napędu pompy. 1 – silnik elektryczny, 2 – zespół kół zębatach, 3 – łożyska wałka rozrządu, 4 – pompa wtryskowa Bosch



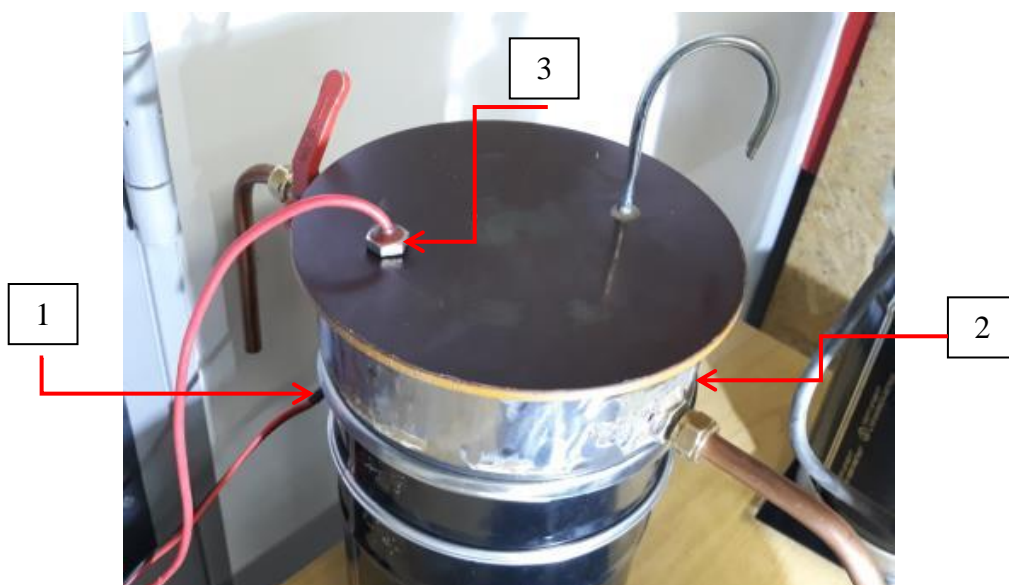
Rys. 3.3. Widok układu napędu pompy. 1 – zespół kół zębatach, 2 – łożysko wałka rozrządu, 3 – wałek rozrządu z krzywką, 4 – płyta mocująca pompę wtryskową, 5 – popychacz nurnika pompy wtryskowej Bosch

- Układ podgrzewania i regulacji temperatury paliwa

Układ składa się z dwóch podsystemów tzn. układu kontrolno-regulacyjnego oraz wykonawczego. Sterowanie elementem grzejnym (spiralą grzewczą) o mocy ok. 1,5 kW zrealizowano na platformie Arduino z zastosowaniem cyfrowego czujnika temperatury DS18B20 sterującego przekaźnikiem w układzie zasilania grzałki. Widok elementów podsystemu przedstawiono na Rys. 3.4. – 3.5.



Rys. 3.4. Układ kontrolno-regulacyjny temperatury paliwa. 1 – termostat, 2 – regulator płyty grzewczej, 3 – rejestrator temperatury oraz wilgotności powietrza.



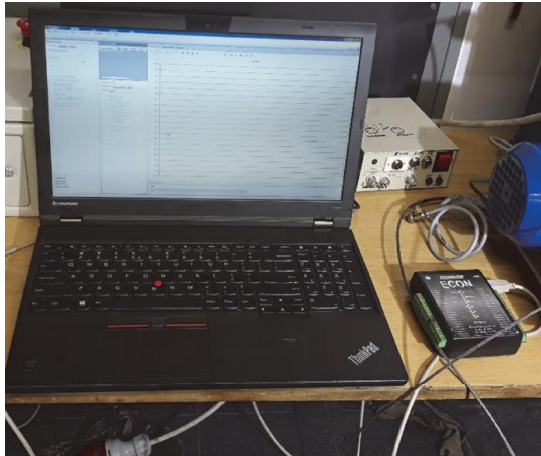
Rys. 3.5. Układ podgrzewacza paliwa. 1 – płyta grzewcza, 2 – zbiornik paliwa, 3 – czujnik DS18B20.

- Układ akwizycji danych pomiarowych

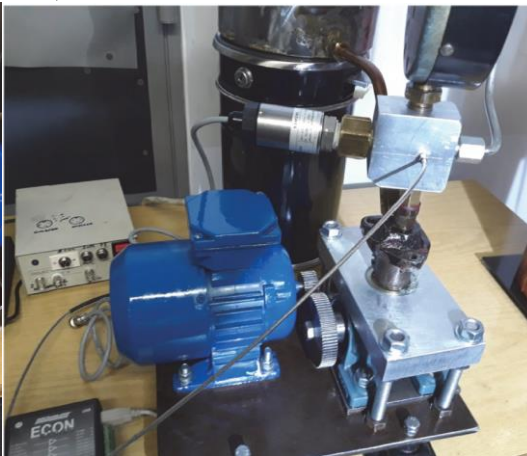
Układ opiera się na komputerowym systemie akwizycji danych wyposażonym w dowolną kartę pomiarową (w przedstawianym przypadku karta DT 9816 firmy Data Translation) z analogowym wejściem napięciowym -10V - +10V, o minimalnej częstotliwości próbkowania ok. 7 kHz. Karta pomiarowa współpracuje z jednej strony z dedykowanym lub uniwersalnym (np. pakiet Matlab z biblioteką Data Acquisition Toolbox) oprogramowaniem akwizycyjnym, z drugiej zaś z następującymi przetwornikami pomiarowymi:

- Przetworniki ciśnienia:
 - Oprand o AutoPSI-TC Sensor, 0-200 Bar, 0.1 Hz to 20 kHz,
 - GEMS seria 3200, 0-250 bar , wyjście napięciowe 0.5-4.5V ($U_{zas} = 8-30\text{vdc}$), nr katalogowy 3200N0250S5W6R00.
- Przetworniki tensometryczne rejestrujące ciężar zużytego paliwa
- Czujnik indukcyjny położenia wału napędowego (rozzędu) pompy
- Wyjście analogowe platformy Arduino – wartość temperatury paliwa

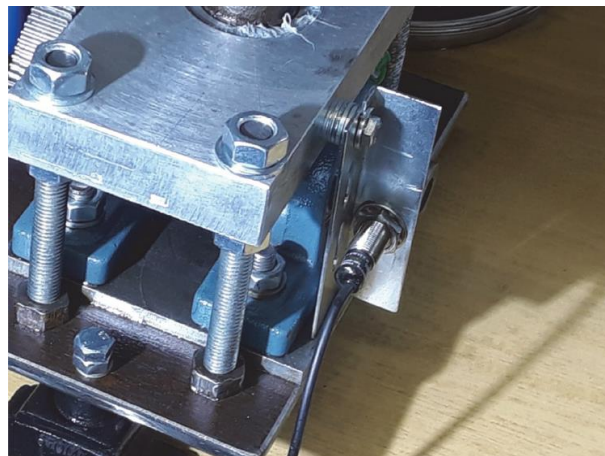
a)



b)



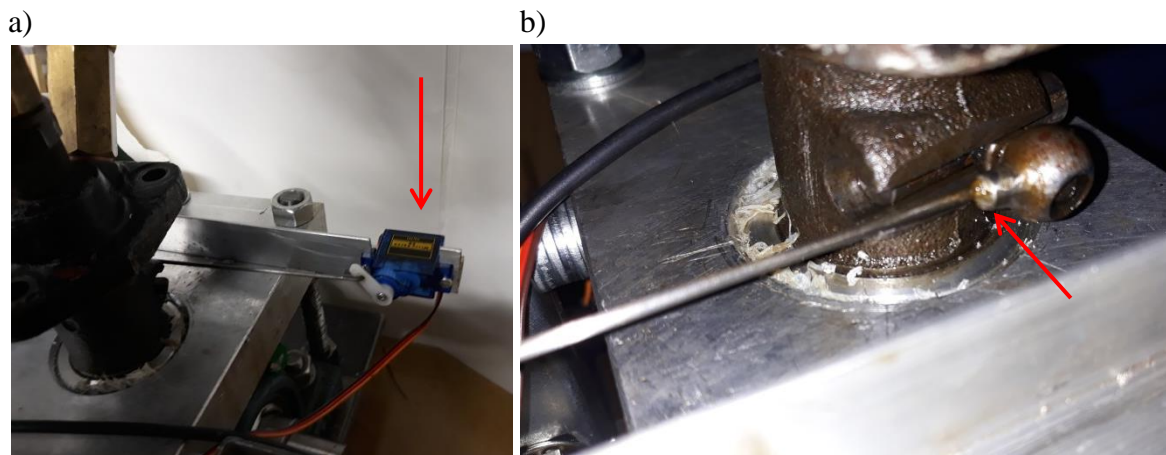
c)



Rys. 3.6. Układ akwizycji danych pomiarowych z zespołem przetworników (czujników). a) komputerowa karta pomiarowa USB – DT 9816; b) blok przetworników ciśnienia; c) czujnik indukcyjny położenia wału napędowego

Uzupełnieniem przedstawionego wyżej układu akwizycji jest zamontowany mini serwomechanizm (sterowany docelowo podobnie jak układ regulacji temperatury paliwa na bazie platformy Arduino) pozwalający uzyskać powtarzalne, rejestrowalne ustawienie listwy

zębatej sekcji tłoczącej pompy wtryskowej. Sposób umiejscowienia oraz zamocowania przedstawiono na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Układ serwo mechanizmu ustawienia listwy zębatej. a) mocowanie serwo mechanizmu do płyty mocującej; b) mocowanie cięgna do listwy zębatej pompy

4. Wyniki badań wstępnych

Badania, których wyniki prezentowane są poniżej zostały przeprowadzone dla paliwa modyfikowanego ECA FUEL (ULSFO, RMD80) [9], które wymaga odpowiedniej temperatury podczas wtrysku tzn. ok. 55-60°C.

Rejestrację wszystkich analizowanych wielkości i procesów przeprowadzono po ustabilizowaniu się temperatury paliwa w zbiorniku.

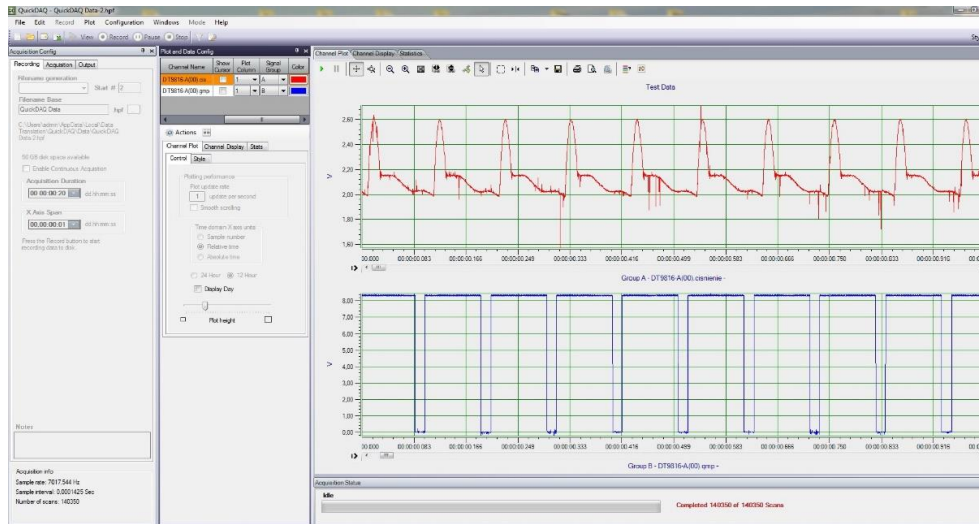
Rejestracji podlegały:

- masa zużytego paliwa w określonym czasie
- zmiany ciśnienia paliwa w przewodach wtryskowych,
- prędkość obrotowa wału krzywkowego (napędzającego sekcję tłoczącą)

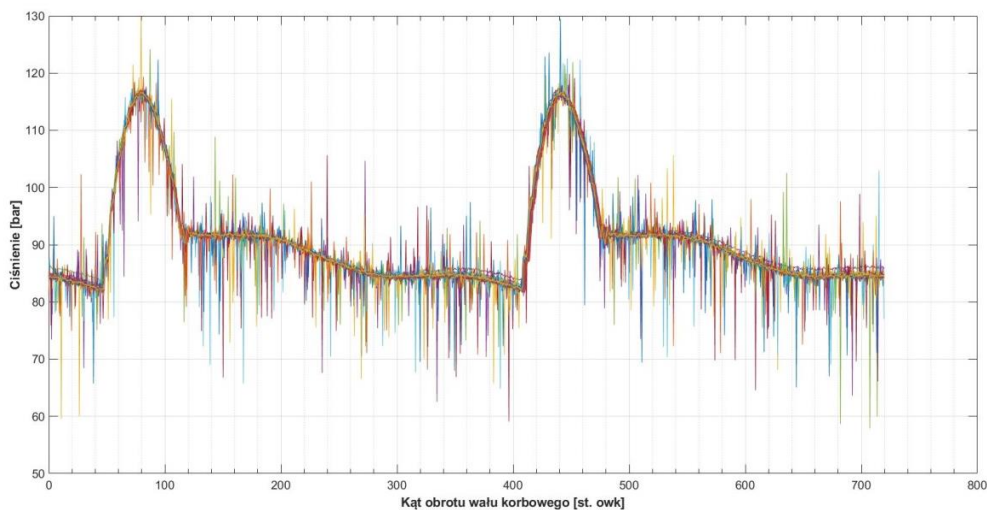
Akwizycję wyników pomiarów przeprowadzono przy użyciu karty pomiarowej DT 9816 firmy Data Transmission a komputerowa rejestracja wyników została przeprowadzona przy pomocy dedykowanego wspomnianej karcie pomiarowej programu QuickDAQ [10]. Przykładową rejestrację danych przedstawiono na rys. 4.1. Rejestrowany w postaci napięciowej sygnał poddano dalszemu opracowaniu z zastosowaniem pakietu Matlab z biblioteką Data Acquisition Toolbox. Zarejestrowany z częstotliwością próbkowania 10 kHz sygnał przedstawiono na rysunku 4.2. Jak widać jest to obraz mało czytelny, na który ma wpływ przede wszystkim duża liczba zakłóceń oraz zjawiska falowe w przewodzie wysokiego ciśnienia. W związku z powyższym dane pomiarowe zostały odfiltrowane filtrem dolnoprzepustowym oraz uśrednione synchronicznie. Przykładowy rezultat został przedstawiony na rysunku 4.3.

Tab. 4.1. Wyniki badań wydatku paliwa dla wyznaczonej temperatury.

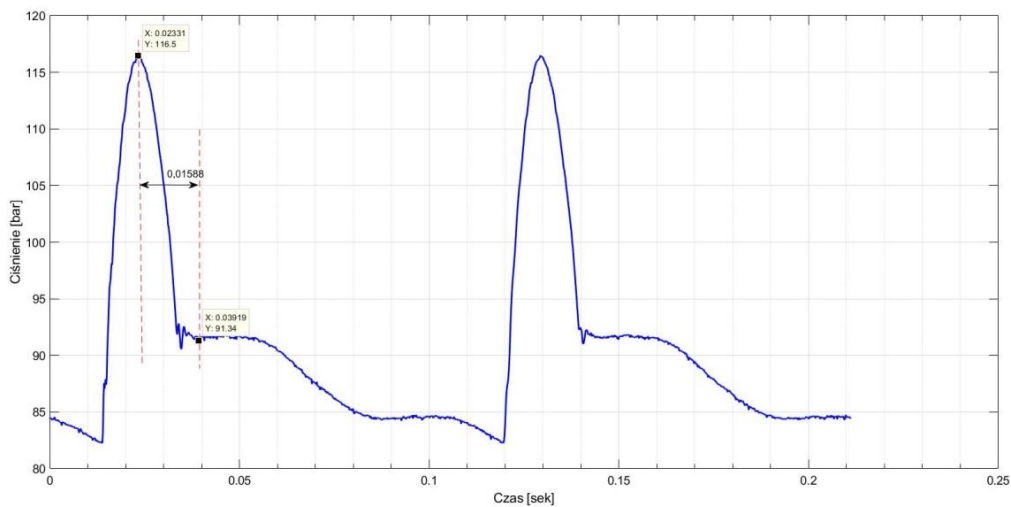
nr pomiaru		nr pomiaru		nr pomiaru		nr pomiaru		nr pomiaru	
1		2		3		4		5	
temp. paliwa	wydatek paliwa	temp. paliwa	wydatek paliwa	temp. paliwa	wydatek paliwa	temp. paliwa	wydatek paliwa	temp. paliwa	wydatek paliwa
°C	g	°C	g	°C	g	°C	g	°C	g
60,4	40	60,2	40	60,1	48	59,7	60	59,5	70



Rys. 4.1. Widok ekranu komputera w po uruchomieniu programu rejestracji danych pomiarowych za pomocą programu QuickDAQ

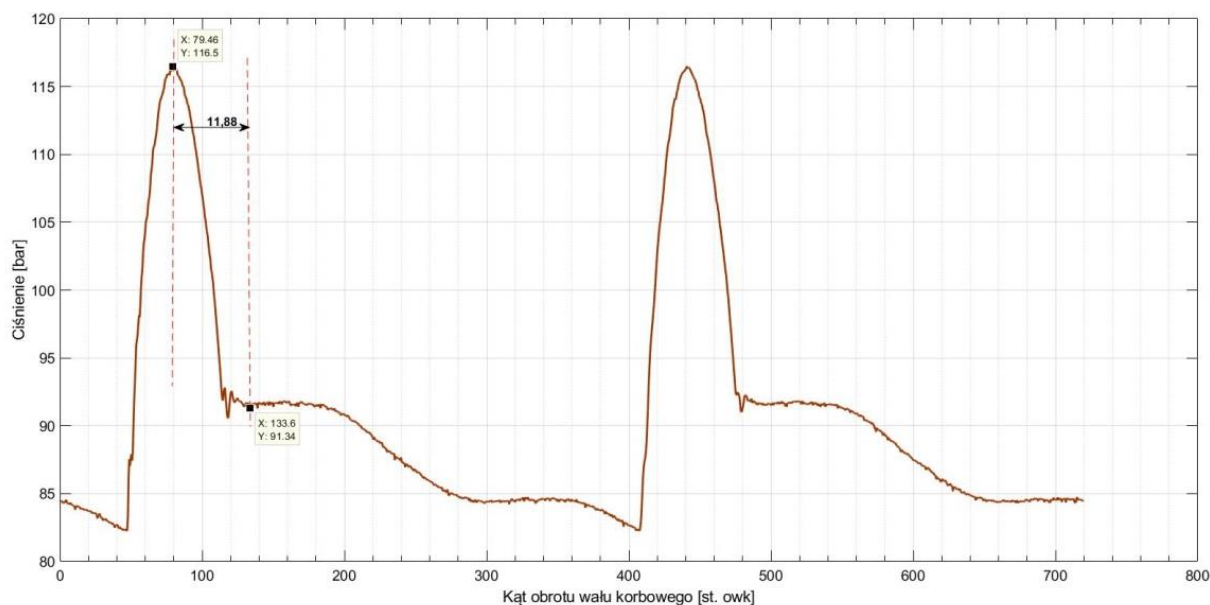


Rys. 4.2. Zarejestrowany sygnał ciśnienia w przewodzie wtryskowym – sygnał „zaszumiony”, naniesione około 500 przebiegów ciśnienia



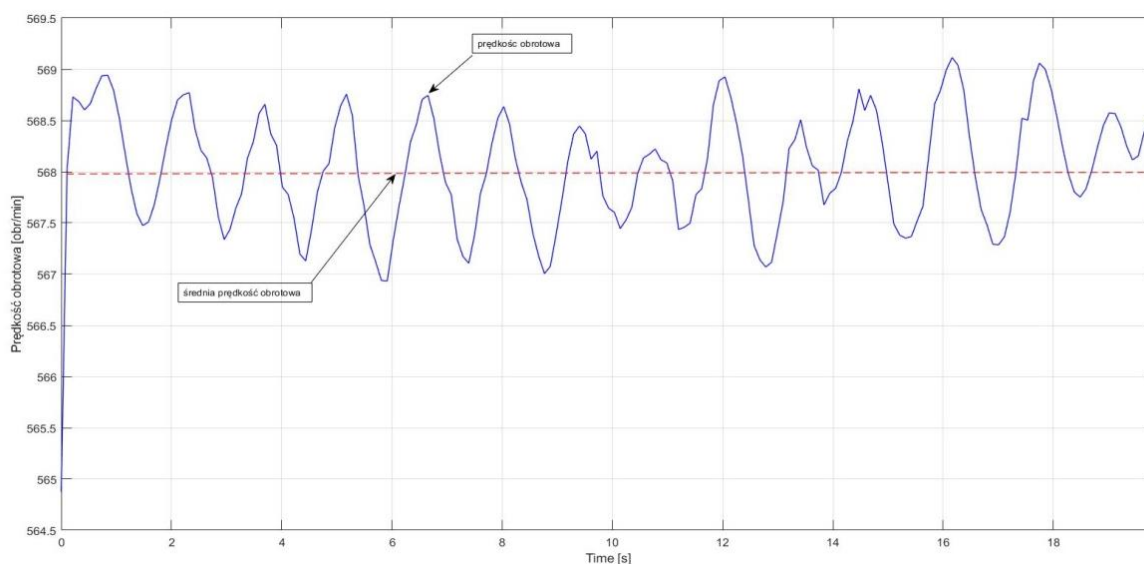
Rys. 4.4. Przebieg ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym jako funkcji czasu z naniesionymi wartościami wielkości charakterystycznych

W kolejnym etapie wyznaczono przebiegi ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym jako funkcji położenia kąтового wałka krzywkowego pompy wtryskowej oraz wyznaczono wielkości charakterystyczne związane z procesem wtrysku np. kąt wtrysku – rys.



Rys. 4.5. Przebieg ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym jako funkcji kąta obrotu wałka krzywkowego z zaznaczonym kątem trwania wtrysku.

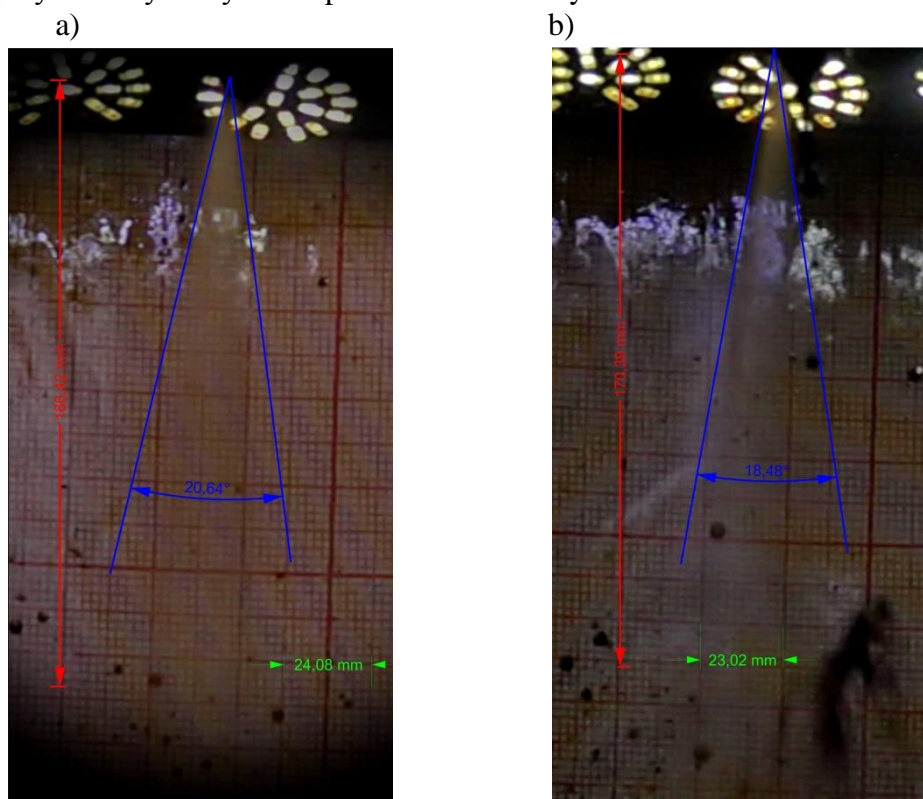
Jednocześnie z pomiarami, których wyniki przedstawiono powyżej odbywał się prędkości obrotowej wałka krzywkowego, którego rejestracja pozwoliła min. na wyznaczenie wartości średniej tej wielkości – rys. 4.6.



Rys. 4.6. Wykres chwilowej prędkości obrotowej wałka krzywkowego i jej wartość średnia

Równoległe do pomiarów opisywanych wyżej wielkości odbywała się rejestracja video procesu wtrysku w trybie „ultra – slow motion” przy pomocy aparatu Sony RX 10_{III}. Obrazy rejestrowano z szybkością 1024 klatek/s.

Wstępnie, za pomocą standardowego, graficznego programu komputerowego określono kąt rozwarcia stożka strugi - α oraz zasięgi strugi wtryskiwanego paliwa - l . Ilustrację graficzną przykładowych wyników przedstawiono na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Wyznaczanie parametrów strugi paliwa:
a) temperatura paliwa 50°C ; b) temperatura paliwa 60°C

5. Uwagi i wnioski końcowe

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań pilotażowych można ogólnie stwierdzić, że zbudowane stanowisko laboratoryjne do badania szeroko rozumianych charakterystyk wtryskiwaczy spełnia zakładane wymagania techniczne.

Po dokonaniu drobnych modyfikacji np.:

- wydaje się wskazane zwiększenie mocy elementu grzejnego do przynajmniej ok. 2000 W, co wpłynie istotnie na skrócenie czasu jednej serii pomiarowej,
 - należy zamontować drugi czujnik temperatury (jak najbardziej oddalony od pierwszego) i jako wielkość sterującą pracą termostatu traktować wartość średnią uzyskaną z pomiaru w dwóch różnych miejscach zbiornika paliwa
- możliwe będzie przejście do kolejnego etapu realizacji badań, a mianowicie przeprowadzenia zasadniczego programu badań eksperymentalnych, który pozwoli na ocenę wpływu pracy rozpylacza w warunkach zasilania silnika dowolnym rodzajem paliwa na jego stan techniczny.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Korczewski Z. i inni: Budowa stanowiska laboratoryjnego do badania innowacyjnej metody suchej odsiarczania spalin silnika zasilanego paliwem pozostałościowym. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej wykonanej w ramach projektu finansowanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku. Nr projektu RX-01/2015. Politechnika Gdańska 2016.
- [2] Korczewski Z. i inni: Metoda oceny ekologicznych, energetycznych i niezawodnościowych skutków stosowania modyfikowanych paliw żeglugowych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym w warunkach rzeczywistych. Dokumentacja techniczna. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej wykonanej w ramach projektu finansowanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku. Nr projektu RX-10/2017. Politechnika Gdańska 2017.
- [3] Korczewski Z. i inni: Charakterystyki energetyczne i emisyjne laboratoryjnego silnika Diesla zasilanego paliwem destylacyjnym ORLEN ECODIESEL oraz paliwem modyfikowanym ECA FUEL w referencyjnym stanie ustalonego obciążenia, a także ocena stanu technicznego jego przestrzeni roboczej po zakończeniu programu badań paliw żeglugowych. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej wykonanej w ramach projektu finansowanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku. Nr projektu RX-10/2017. Politechnika Gdańska 2018.
- [4] Korczewski Z., Marszałkowski K., Rudnicki J.: The concept of research on ecological, energetical and reliability effects of modified marine fuel oils usage to supply compression ignition engines in real conditions. *Combustion Engines*, 4/2017 (171), CE-2017-410, p. 56-61.
- [5] Korczewski Z., Rudnicki J., Zadrąg R.: Laboratory station for research of the innovative dry method of exhaust gas desulfurization for an engine powered with residual fuel. *Combustion Engines*, 1/2017 (168), CE-2017-105, p. 32-37.
- [6] Rudnicki J.: Prototypowe stanowisko laboratoryjne do oceny własności modyfikowanych paliw żeglugowych w zakresie ich wpływu na wskaźniki pracy silnika, *Journal of Polish CIMEEAC* Vol. 12 No 1, 2017, s. 77 – 96.
- [7] <https://www.iso.org/standard/64247.html>
- [8] Emission Standards, International: IMO Marine Engine Regulations. <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/ghg/pages/default.aspx>
- [9] <https://www.stenaoil.com/services/services/>
- [10] <http://www.datatranslation.co.uk/gb/software/test-and-measurement-software/quickdaq/data-logger,1397.html?merk=a560ff3b7dcdaefa78908a2b61b55f32>