

MODERNIZACJA STANOWISKA DO BADANIA WTRYSKIWACZY W WARUNKACH ZASILANIA SILNIKA PALIWAMI MODYFIKOWANYMI

Jacek Rudnicki
Konrad Marszałkowski
Norbert Ochał

Politechnika Gdańska
Ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
e-mail: konmarsz@pg.edu.pl

Abstrakt

Artykuł przedstawia tematykę stanowiącą kontynuację podjętej przez zespół badawczy Katedry Siłowni Morskich i Lądowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej problematyki oceny charakterystyk przepływowych wtryskiwaczy zasilanych modyfikowanymi paliwami żeglugowymi w skrajnie różnych warunkach otoczenia. Przeprowadzone na prototypowym stanowisku badania pilotażowe [8, 9] pozwoliły na doprecyzowanie założeń projektowych, określenie poziomu sygnałów z przetworników zamontowanych na stanowisku badawczym oraz przydatność zastosowanej aparatury pomiarowej. Podczas badań zwrócono również uwagę na konieczność zmian konstrukcyjnych umożliwiających zasilanie wtryskiwaczy paliwem o temperaturze odpowiadającej warunkom zimowym tzn. ujemnym lub bliskim ujemnym. Zmiany takie zostały dokonane, przeprowadzono badania pilotażowe a w referacie zaprezentowano efekty prac nad przedmiotowym stanowiskiem.

Słowa kluczowe: *paliwa pozostałościowe, wtrysk paliwa, charakterystyka wtryskiwacza, analiza porównawcza*

1. WPROWADZENIE

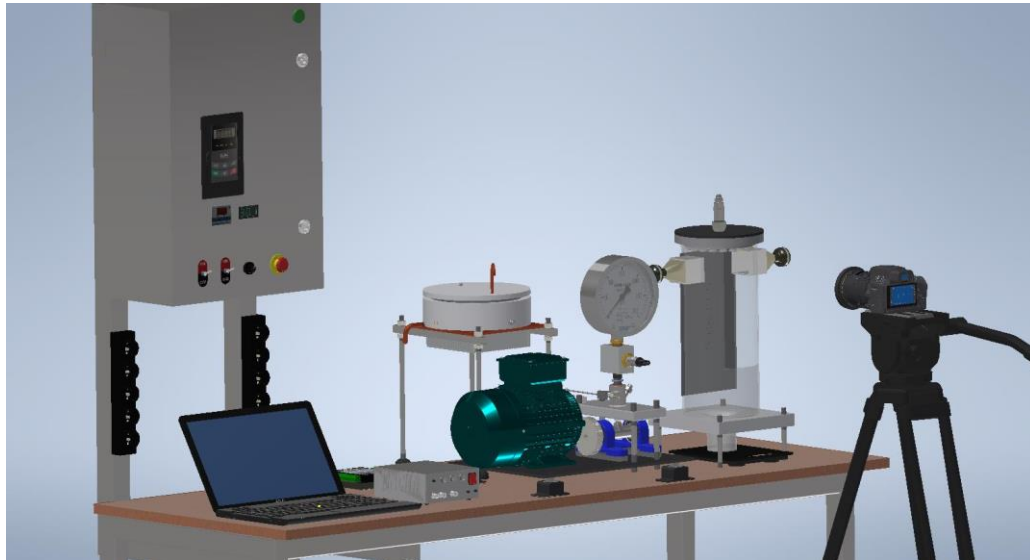
Zebrane obserwacje poczynione podczas przeprowadzania badań pilotażowych na stanowisku do badań wtryskiwaczy paliw okrętowych [14] oraz studium analityczno – krytyczne opracowań w zakresie przedmiotowej tematyki [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13] określiły konieczny zakres jego rozbudowy oraz wskazały parametry kontrolne wymagające rejestracji oraz precyzyjnej regulacji. W zakres prac modernizacyjnych weszły następujące zagadnienia:

1. Zaprojektowanie i wykonanie układów zdalnego sterowania, regulacji i stabilizacji:
 - temperatury paliwa (w zakresie typowych temperatur roboczych wtryskiwacza paliwa oraz temperatur ujemnych),
 - prędkości obrotowej wału krzywkowego sekcji tłoczącej,
 - położenia listwy paliwowej.
2. Przygotowanie fotograficznego układu ekspozycji strugi rozpylanego paliwa przez wtryskiwacz, pozwalającego na obserwację tego procesu z prędkością rejestracji 1000 klatek/s i zapewniającego jednocześnie stałe i powtarzalne warunki oświetlenia dla toru optycznego szybkiego rejestratora typu RX 10III firmy SONY.

2. ZMIANY MODERNIZACYJNE STANOWISKA

Zaprojektowanie i wykonanie układów zdalnego sterowania, regulacji oraz stabilizacji zbudowany w oparciu o jednostopniową pompę paliwową typu Bosch PFR1K65A332/11 napędzaną.

Projektowy model 3D stanowiska przedstawiono na rysunku 1. Pompa napędzana jest silnikiem trójfazowym o mocy 750 W. Silnik zasilany jest z wykorzystaniem przemiennika częstotliwości umożliwiającego regulację prędkości obrotowej wału napędowego w zakresie prędkości od 0 do 1500 obr/min. Wbudowane filtry EMC oraz pięć rodzajów sterowania umożliwiają wiele alternatywnych kombinacji w zakresie sygnałów wejściowych oraz wyjściowych. Wał krzywkowy pompy napędzany jest od silnika za pośrednictwem zespołu kół zębatach o przełożeniu 2:1. Robocza wersja stanowiska przedstawiona została na rysunku 2.



Rys.1. Widok ogólny projektu układów zdalnego sterowania, regulacji i stabilizacji wtrysku paliwa



Rys. 2. Widok stanowiska do badania strugi rozpylanego paliwa.

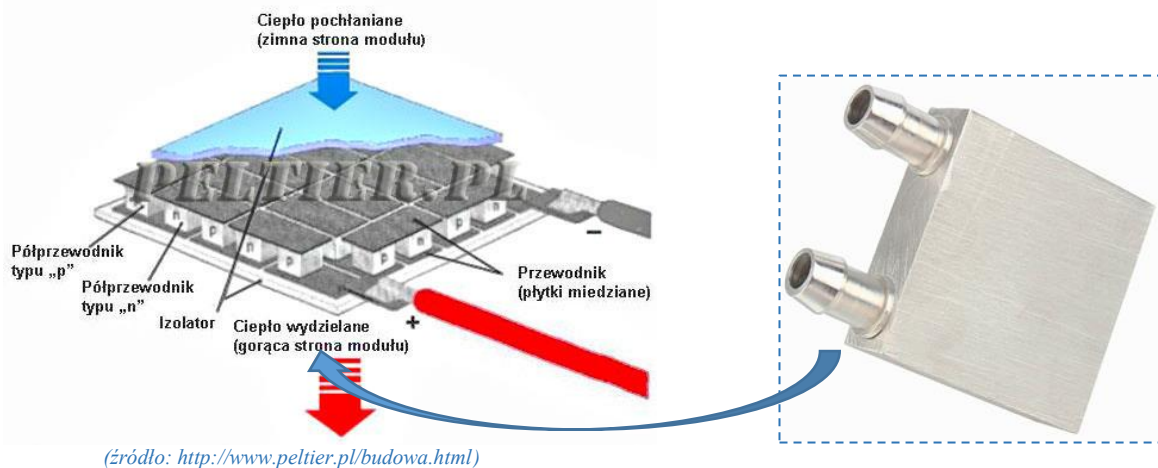
Pierwotne założenia projektowe zakładały badania różnego rodzaju paliw żeglugowych w warunkach odpowiadających siłownianym, co ograniczało się do konieczności podgrzewania badanego paliwa. W tym celu została zaprojektowana specjalnie przystosowana do potrzeb badań płyta grzewcza, wyposażona w układ płynnej regulacji temperatury paliwa w zakresie 20 do

150 °C. Sterowanie elementem grzejnym (spirala grzewcza) o mocy ok. 1,5 kW zrealizowano na platformie Arduino z zastosowaniem cyfrowego czujnika temperatury DS18B20 sterującego przekaźnikiem w układzie zasilania grzałki.

Celem rozszerzenia możliwości badawczych prezentowanego stanowiska o wariant określania charakterystyk przepływowych wtryskiwacza paliwa w zakresie ujemnych temperatur wtryskiwanego paliwa konieczne było doposażenie linii paliwowej o półprzewodnikowe moduły termoelektryczne (tzw. ogniwa Peltiera) [17]. Projekt wstępny zakładał chłodzenie wyłącznie zbiornika na badane paliwo. Niestety relatywnie mały przepływ paliwa (wynikający z niewielkiej wydajności sekcji tłoczącej pompy wtryskowej) powodował zbyt długi czas stabilizacji termicznej całej linii przesyłu paliwa tj. zbiornik – przewód zasilający - pompa wtryskowa - przewód wysokiego ciśnienia - wtryskiwacz, wiążący się w praktyce ze stratami uniemożliwiającymi uzyskanie założonych warunków pracy wtryskiwacza w temperaturach ujemnych.

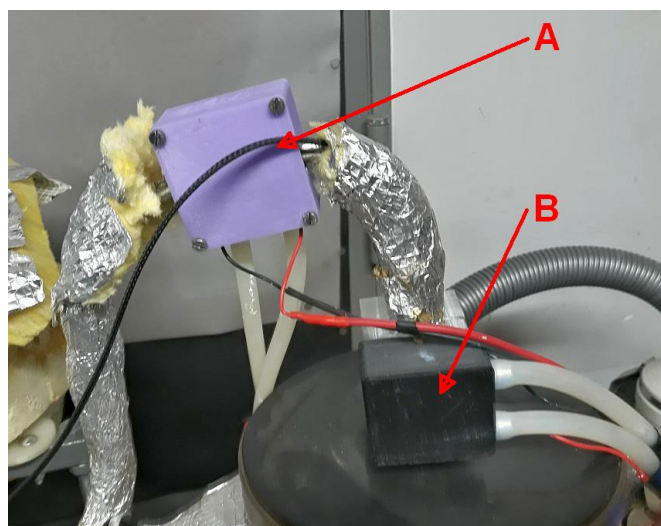
W związku z powyższym, konieczne okazało się zapewnienie dodatkowego chłodzenia przewodu wysokociśnieniowego oraz korpusu wtryskiwacza, dodatkowymi modułami termoelektrycznymi.

Zgodnie z zasadą działania ogniwa termoelektrycznego i zachodzącym w nim efektowi Peltiera jedna z okładzin modułu jest płaszczyzną odbierającą ciepło a druga oddającą ciepło. Ilość odprowadzonego ciepła zależna jest od natężenia płynącego prądu przez moduł, jednakże sam przepływ prądu przez strukturę półprzewodnikową powoduje wydzielanie się ciepła w samym module (w wyniku oporu elektrycznego jego struktury). Dlatego też, niezwykle istotnym z punktu widzenia eksploatacji tego typu modułów w zastosowaniach wymagających utrzymania temperatur ujemnych jest uzyskanie jak najniższej temperatury płaszczyzn oddających ciepło (tak zwanej strony „gorącej” modułu). Rozwiązanie tego problemu opiera się na wykorzystaniu do chłodzenia modułów Peltiera wody z instalacji wodociągowej której temperatura zazwyczaj nie przekracza 10°C. Ciepło ze strony „gorącej” każdego z modułów przejmowane jest do wody chłodzącej za pomocą chłodnic wykonanych ze stopu aluminium, powszechnie wykorzystywanych w technice komputerowej (chłodzenie cieczą układów mikroprocesorowych) – rys. 3

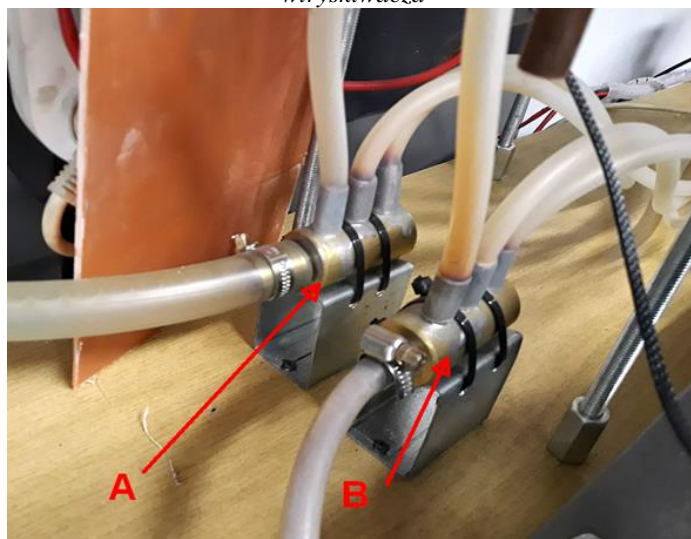


Rys. 3. Zasada działania oraz widok chłodnicy wykorzystanej do chłodzenia modułów Peltiera

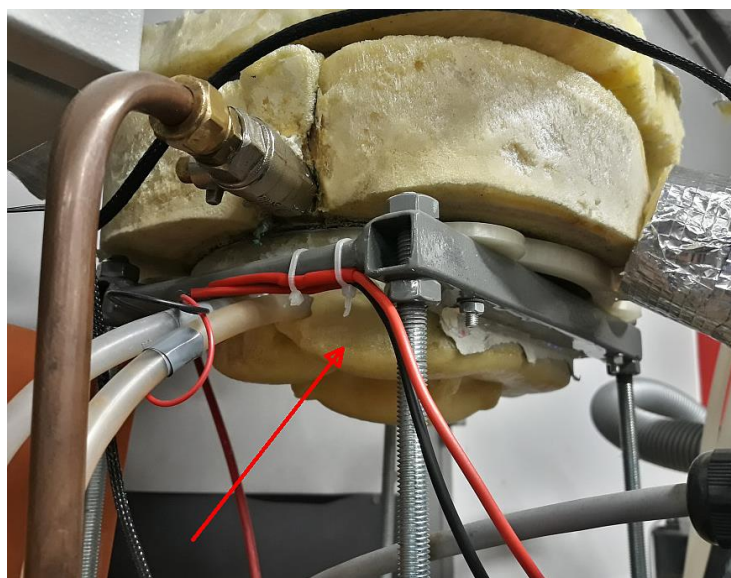
Zastosowane do chłodzenia poszczególnych elementów linii paliwowej ogniwa Peltiera to moduły typu TEC1-12710 o wymiarach 40x40x3,2mm i mocy maksymalnej wynoszącej 150W (przy zasilaniu napięciem 12V). Moduły przy zachowaniu izolacji termicznej pomiędzy płaszczyznami „gorącą” i „zimną” pozwalają na uzyskanie maksymalnego spadku temperatur wynoszącego aż 67°C. Dla wszystkich trzech chłodzonych punktów linii paliwowej (zbiornik paliwa, przewód wysokociśnieniowy i wtryskiwacz) osłony termiczne wykonano z poliaktydu, w technologii druku przestrzennego. Na rys. 4, 5, 6 przedstawiono szczegóły konstrukcyjne układu chłodzenia paliwa.



Rys. 4. Sposób montażu modułów Peltiera na linii paliwowej stanowiska badawczego:
 A – moduł Peltiera zamontowany na przewodzie wysokociśnieniowym, B – moduł Peltiera zamontowany na korpusie wtryskiwacza



Rys. 5. Sposób zasilania wodą poszczególnych chłodziw modułów Peltiera:
 A – odpływ wody chłodzącej, B – zasilanie wodą z sieci wodociągowej



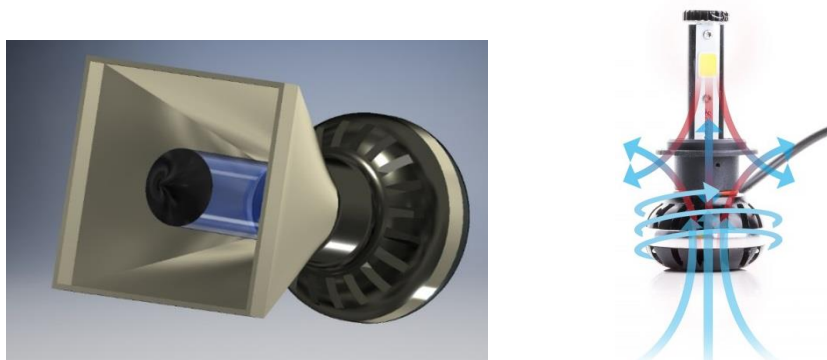
Rys. 6. Widok ogólny zbiornika paliwa (strzałką wskazano umiejscowienie modułu Peltiera)

W celu rejestrowania przebiegu strugi rozpylonego paliwa został dołączony moduł rejestrujący, którego głównym elementem jest widoczny na rys. 7 aparat Sony RX 10_{III}. [14] Podczas badań wykorzystywany jest tryb HFR (High Frame Rate), który filmuje obraz z prędkością 1024 klatek na sekundę.

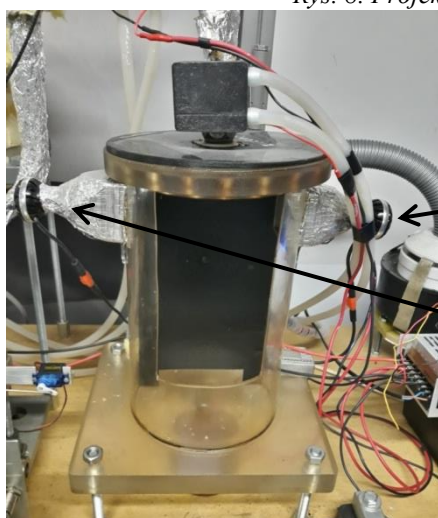
Uzyskanie wysokiej jakości rejestrowanego obrazu wymusiło konieczność wykonania dodatkowego źródła światła. Zaprojektowano oraz wykonano dwa oddzielne powiązane ze sobą układy doświetlenia rejestrowanego obrazu. W pierwszym źródła oświetlenia żarówki halogenowe P21/5W 22 LED z możliwością regulacji intensywności źródła oświetlenia przedstawione na rysunku nnn. Natomiast drugi, którego głównymi elementami są żarówki LED z diodami COB oraz filtrami 8000 EPLH39 zapewniając stałe i odpowiednie parametry strumienia świetlnego, które podczas użytkowania nie ulegną zmianie oraz systemy zapobiegające powstawaniu nadmiernej wysokiej temperaturze wewnątrz obudowy żarówek. Rysunek 8 przedstawia w uproszczeniu dosyć skomplikowane działanie zaawansowanego systemu chłodzenia zastosowanego w tych żarówkach.



Rys. 7. Widok aparatu Sony RX 10_{III}



Rys. 8. Projekt układu doświetlania rejestrowanego obrazu.



Rys. 9. Widok ogólny układu doświetlania rejestrowanego obrazu.

3. WYNIKI BADAŃ „POMODERNIZACYJNYCH”

3.1 Założenia i przebieg badań

Badania, których wyniki prezentowane są poniżej zostały przeprowadzone dla paliwa Ekodiesel ULTRA koncernu ORLEN [15].

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

Przeprowadzone zostały 4 serie pomiarowe dla następujących, założonych temperatur paliwa w zbiorniku oraz odpowiadającym im temperaturom paliwa bezpośrednio przed wtryskiwaczem:

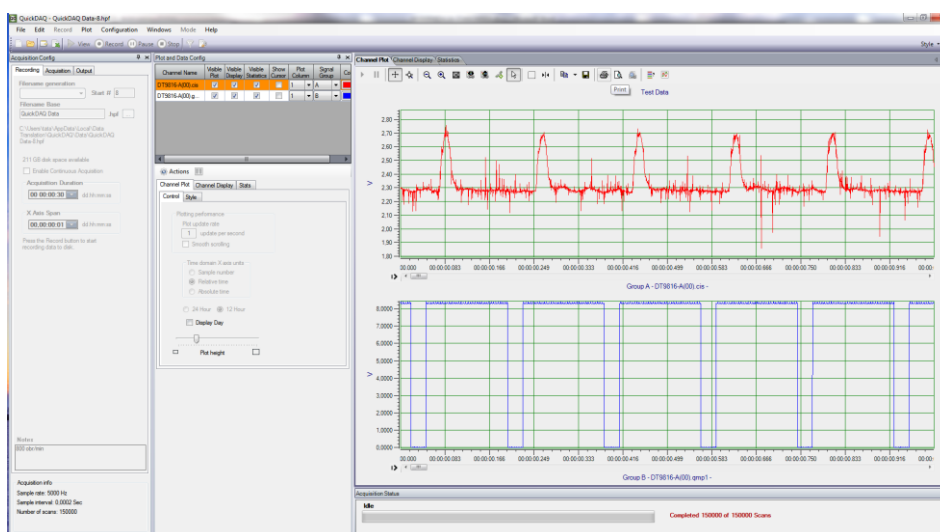
- Seria I – temperatura paliwa w zbiorniku ok. 11°C, temperatura paliwa bezpośrednio przed wtryskiwaczem ok. 1°C;
- Seria II – temperatura paliwa w zbiorniku ok. 8°C, temperatura paliwa bezpośrednio przed wtryskiwaczem ok. -0,5°C;
- Seria III – temperatura paliwa w zbiorniku ok. 3°C, temperatura paliwa bezpośrednio przed wtryskiwaczem ok. -1,1°C;
- Seria IV – temperatura paliwa w zbiorniku ok. -3°C, temperatura paliwa bezpośrednio przed wtryskiwaczem ok. -1,2°C;

Rejestracji podlegały:

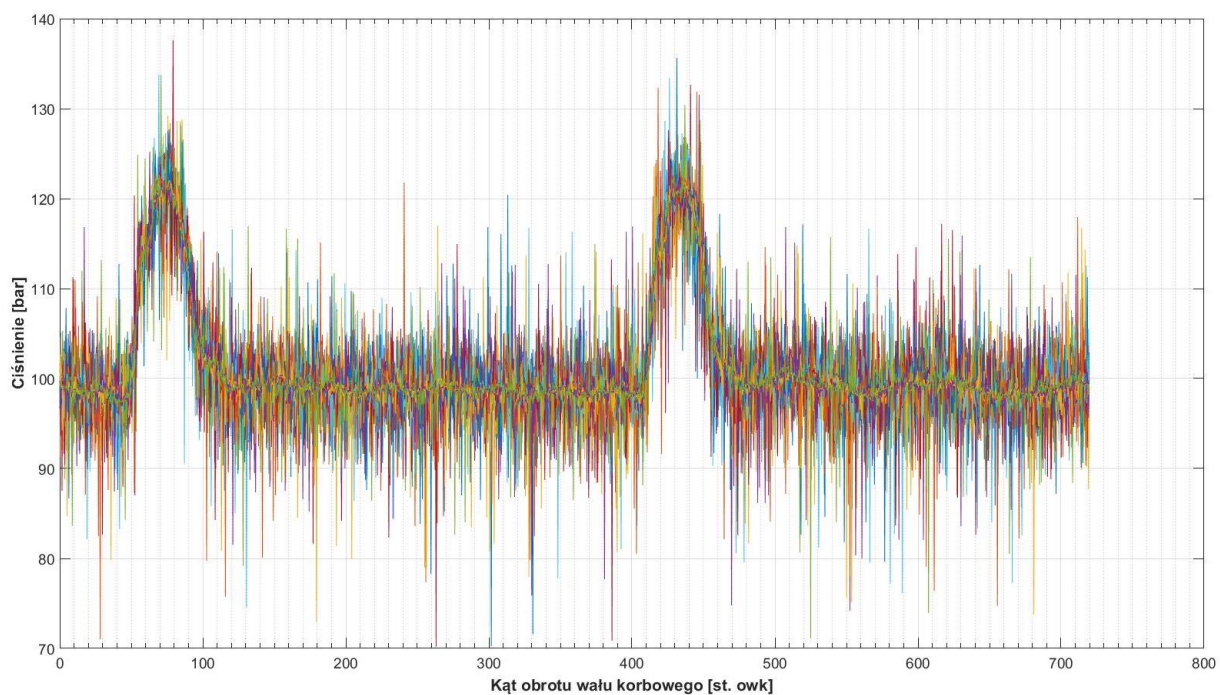
- masa zużytego paliwa w określonym czasie
- zmiany ciśnienia paliwa w przewodach wtryskowych,
- prędkość obrotowa wału krzywkowego (napędzającego sekcję tłoczącą)
- rozwój strugi wtryskiwanego paliwa w czasie – rejestracja fotograficzna w trybie „slow motion” (1024 kl/s)

Akwizycję wyników pomiarów przeprowadzono przy użyciu karty pomiarowej DT 9816 firmy Data Transmission a komputerowa rejestracja wyników została przeprowadzona przy pomocy dedykowanego karcie pomiarowej programu QuickDAQ [16]. Przykładowy zrzut ekranowy z programu przedstawiono na rys. 10.

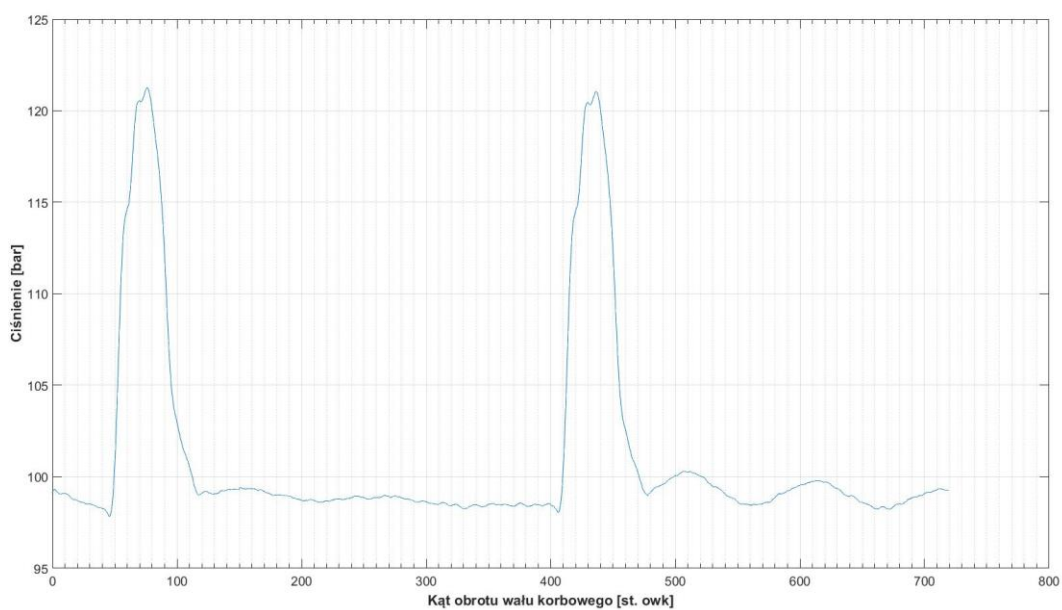
Rejestrowany w postaci napięciowej sygnał poddano dalszemu opracowaniu z zastosowaniem pakietu Matlab z biblioteką Data Acquisition Toolbox. Zarejestrowany z częstotliwością próbkowania 10 kHz sygnał przedstawiono na rysunku 11. Jak widać jest to obraz mało czytelny, na który ma wpływ przede wszystkim 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 12.



Rys. 10. Widok ekranu komputera w po uruchomieniu programu rejestracji danych pomiarowych za pomocą programu QuickDAQ

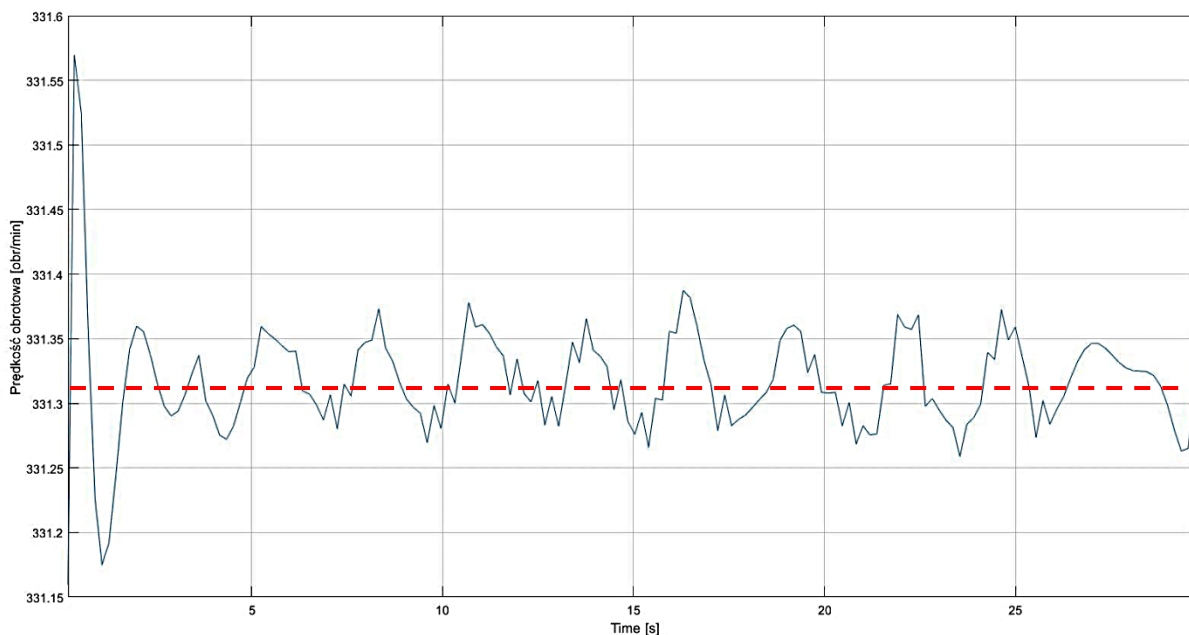


Rys. 11. Zarejestrowany sygnał ciśnienia w przewodzie wtryskowym (dwa obroty wału krzywkowego pompy) – sygnał „zaszumiony”, naniesione około 1800 przebiegów ciśnienia



Rys. 12. Przebieg ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym jako funkcji kąta obrotu wału krzywkowego pompy wtryskowej

Jednocześnie z pomiarami, których wyniki przedstawiono powyżej odbywał się pomiar prędkości obrotowej wałka krzywkowego, którego rejestracja pozwoliła min. na wyznaczenie wartości średniej tej wielkości – rys. 14.

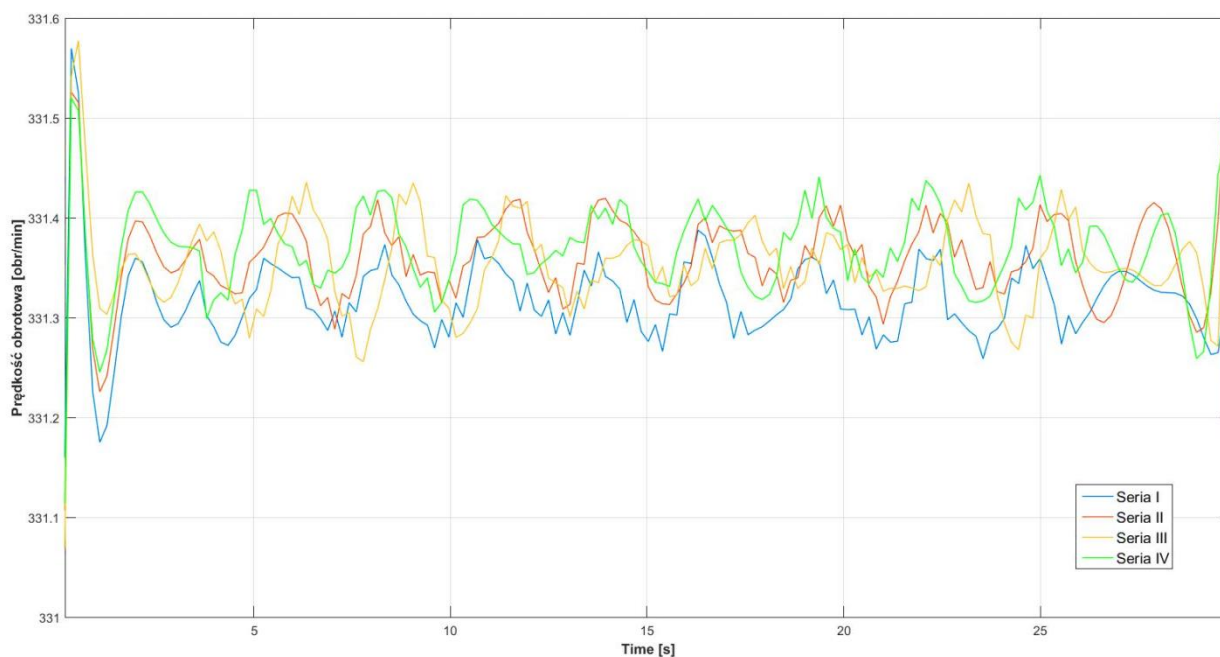


Rys. 13. Wykres chwilowej prędkości obrotowej wałka krzywkowego i jej wartość średnia

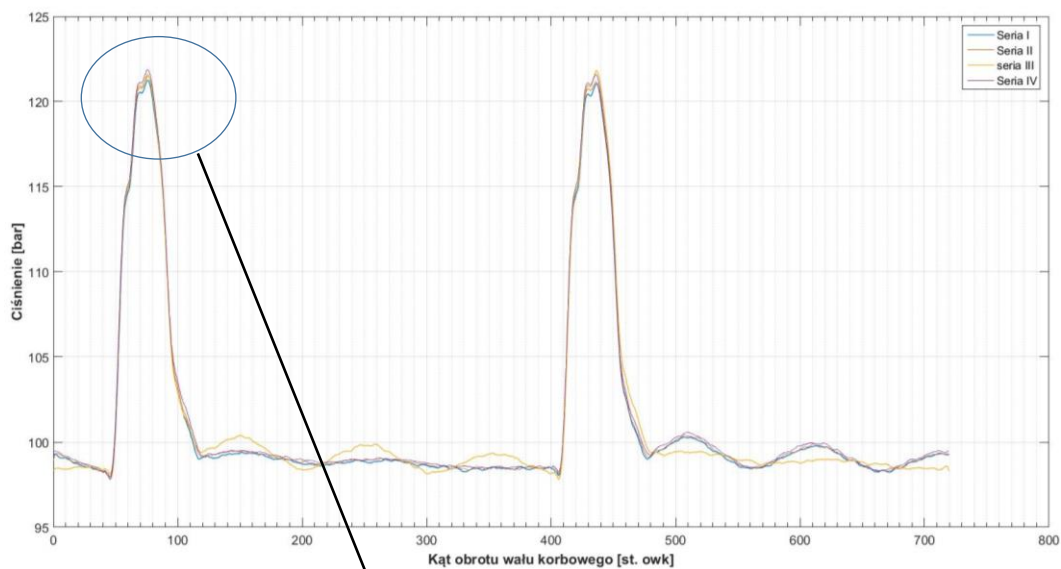
3.1 Wyniki badań i ich analiza porównawcza

Wyniki uzyskane podczas badań weryfikacyjnych przedstawiono w dalszej części podrozdziału w formie wykresów, na których zobrazowano zmiany rozpatrywanych wielkości fizycznych jako funkcję kąta obrotu wału krzywkowego pompy wtryskowej - α lub czasu - t. Są to kolejno:

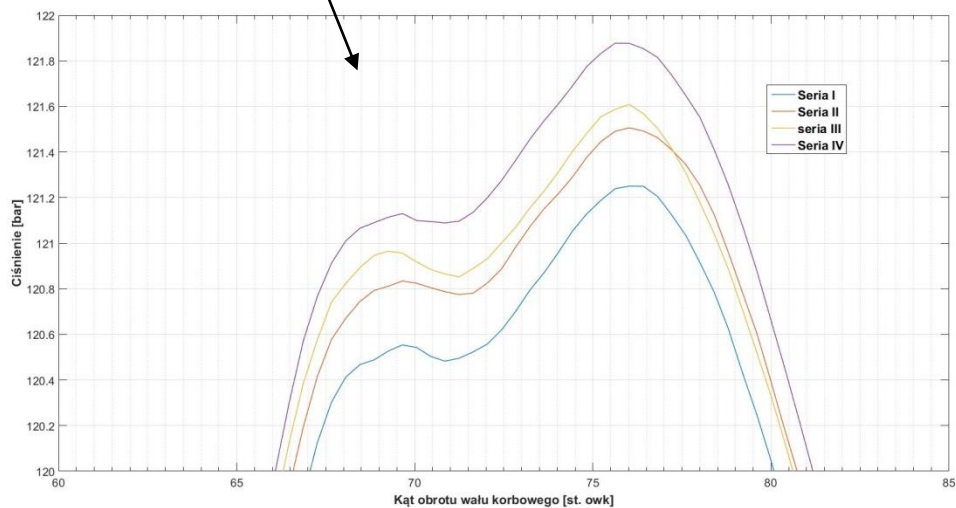
- chwilowe zmiany prędkości obrotowej – $n = f(t)$
- chwilowe zmiany ciśnienia w przewodzie wtryskowym – czujnik ciśnienia zlokalizowany bezpośrednio przed wtryskiwaczem – $p = f(\alpha)$
- zmiany stopnia przyrostu ciśnienia w przewodzie wtryskowym - $\frac{dp}{d\alpha} = f(\alpha)$



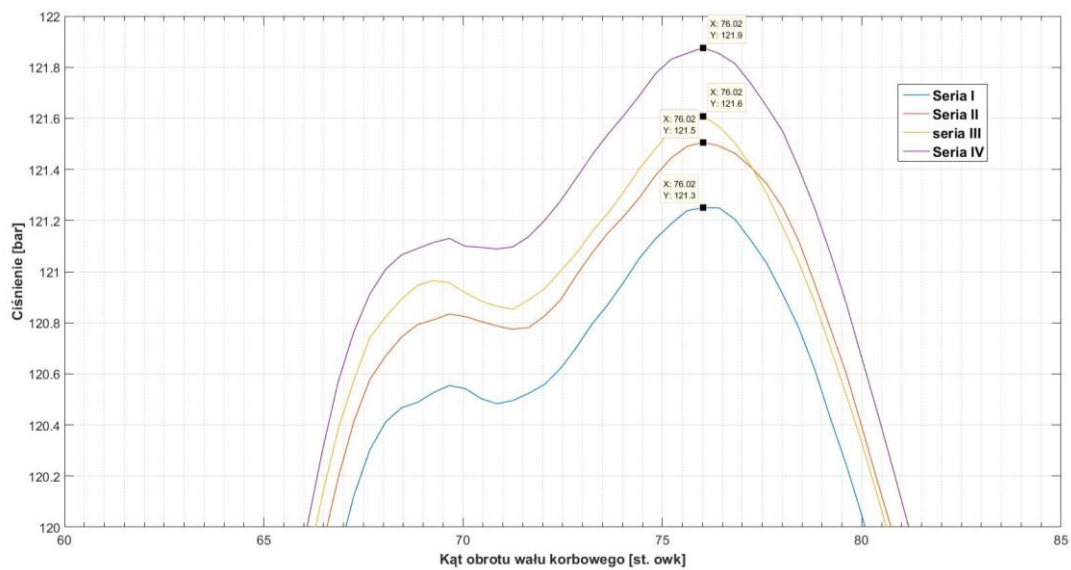
Rys. 14. Zmiany chwilowej prędkości obrotowej podczas rejestracji kolejnych serii pomiarowych jako funkcja czasu
a)



b)

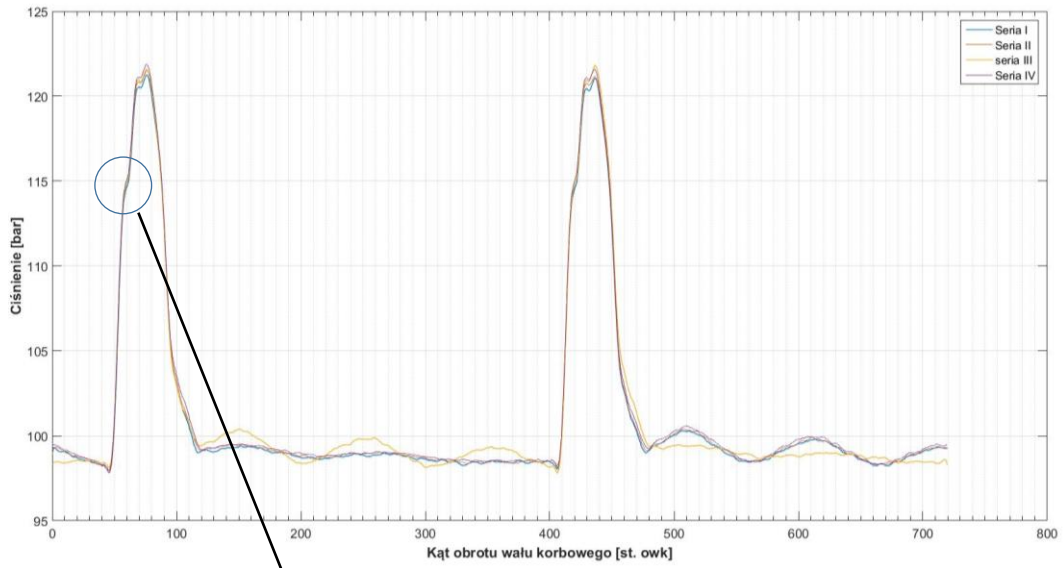


c)

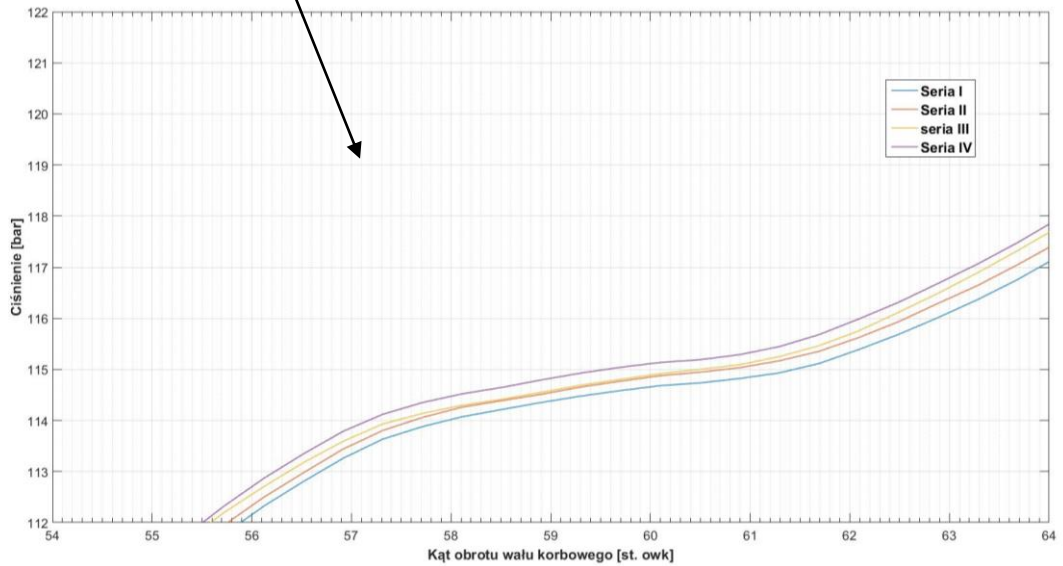


Rys. 15. Zmiany ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym podczas rejestracji kolejnych serii pomiarowych jako funkcja kąta obrotu wału krzywkowego pompy wtryskowej

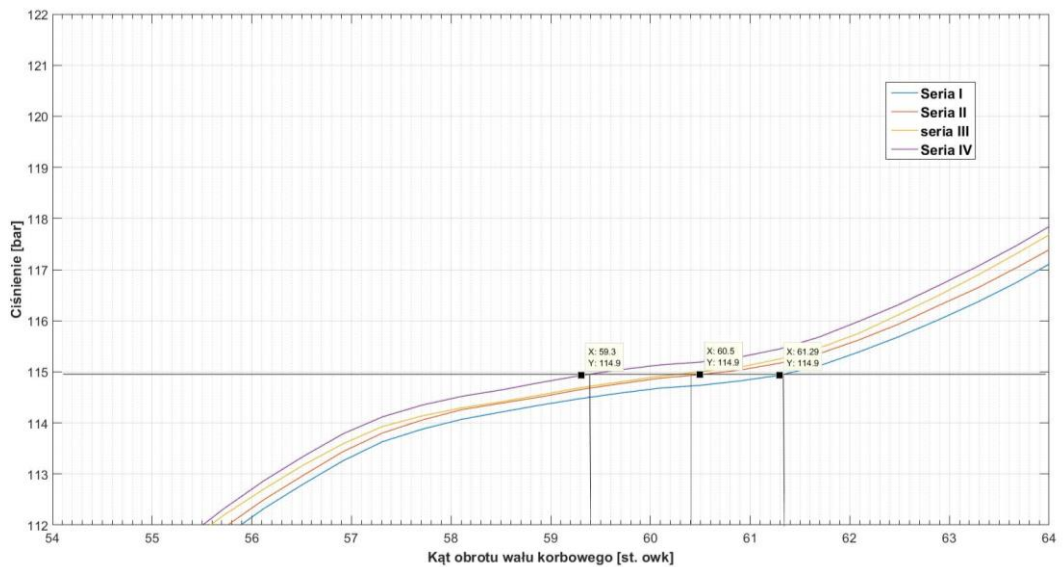
a)



b)

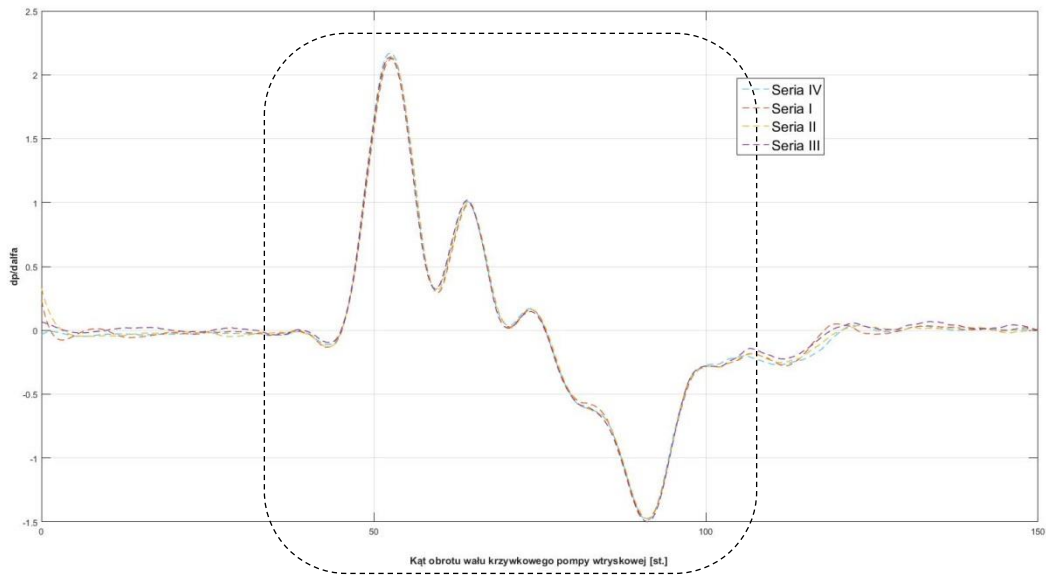


c)

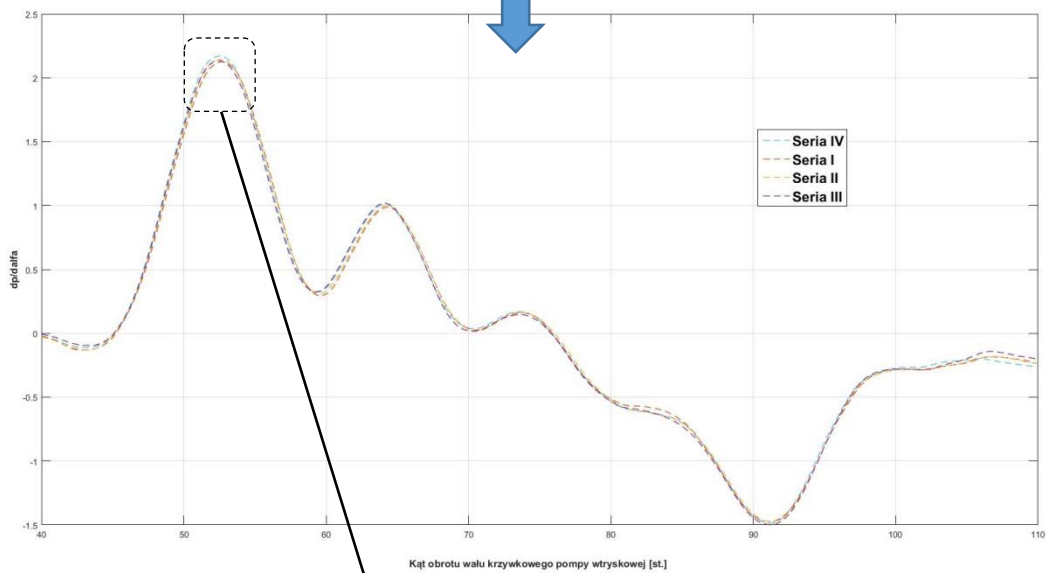


Rys. 16. Zmiany ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym podczas rejestracji kolejnych serii pomiarowych jako funkcja kąta obrotu wału krzywkowej pompy wtryskowej

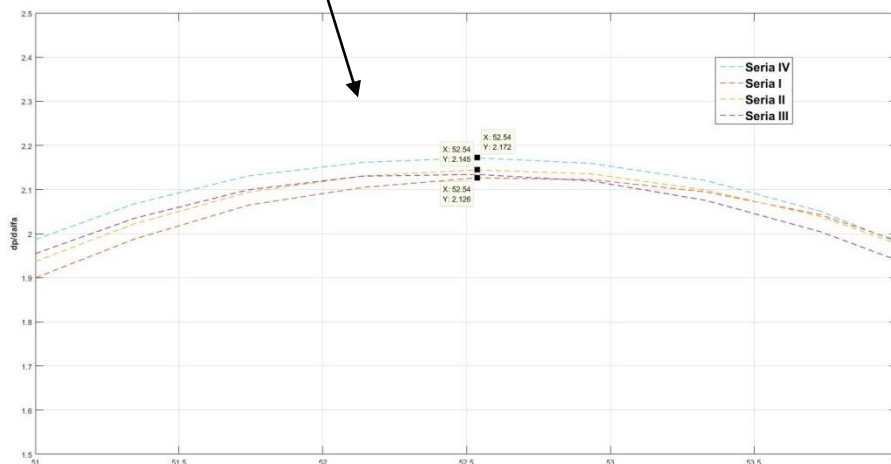
a)



b)



c)



Rys. 17. Zmiany stopnia przyrostu ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym podczas rejestracji kolejnych serii pomiarowych jako funkcja kąta obrotu wału krzywkowego pompy wtryskowej

Analiza wyników przedstawionych na rys. 14 – 17 oraz obserwacje poczynione podczas

badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- stanowisko stwarza na obecnym etapie możliwość badania wpływu ujemnych temperatur na przebieg wtrysku w ograniczonym zakresie tzn. nie udało się obniżyć temperatury paliwa przed wtryskiwaczem do wartości niższej niż $-1,2^{\circ}\text{C}$
- pomimo niewielkich różnic w temperaturach paliwa zasilającego rejestrowane wielkości w kolejnych seriach pomiarowych wykazują obserwowalne różnice (np. rys. 15c, 16c, 17c) co już na tym etapie umożliwia prowadzenie stosownych analiz
- układ sterowania prędkością obrotową spełnia swoją rolę w stopniu bardzo dobrym (rys. 14) wahania prędkości obrotowej wałka krzywkowego pompy wtryskowej nie przekraczają 0,01%

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników przeprowadzonych na kolejnym etapie budowy (modernizacji) stanowiska można stwierdzić, że zbudowane stanowisko laboratoryjne do badania szeroko rozumianych charakterystyk wtryskiwaczy spełnia zakładane wymagania techniczne, jednak nadal w ograniczonym zakresie.

Usunięcie istniejących ograniczeń wymaga zmiany istniejącego rozwiązania chłodzenia paliwa na ogniwa Peltiera o większych wydajnościach chłodzenia np. moduły typu TMC-241-1.6-15.0MMS o wymiarach 50 x 50 x 7,5 mm i mocy maksymalnej wynoszącej 225 W (przy zasilaniu napięciem 12V) [17] lub jeszcze wydajniejszych np. TB-199-2.0-0.9 mocy maksymalnej wynoszącej 310 W (przy zasilaniu napięciem 24V) [18]. Zmiana ta skutkuje jednocześnie koniecznością rozwiązania nowego układu zasilania umożliwiającego pobór prądu ok. 40 – 50A oraz poprawienia własności termoizolacyjnych poszczególnych elementów stanowiska.

Realizacja powyższych zmian najprawdopodobniej umożliwi przejście do kolejnego etapu realizacji badań, a mianowicie przeprowadzenia zasadniczego programu badań eksperymentalnych, który pozwoli na ocenę wpływu pracy rozpylacza w dowolnych warunkach zasilania silnika dowolnym rodzajem paliwa na jego stan techniczny.

LITERATURA

1. Ambroziak A., Ambroziak T., Kurczewski D.: Podstawowe parametry strugi wtryskiwanego biopaliwa w silniku o zapłonie samoczynnym. Zeszyt naukowy Politechniki Świętokrzyskiej, 2014.
2. Borowski P.: Identyfikacja systemu tworzenia i spalania mieszanki w układzie dwóch wtryskiwaczy z bezpośrednim wtryskiem benzyny. Rozprawa doktorska PP, Poznań 2016.
3. Czejka J., Pielecha I., Wisłocki K.: Analiza porównawcza wtrysku paliwa wtryskiwacza piezoelektrycznego i elektromagnetycznego do silników o ZS. PTNSS-2009-S3-C089.
4. Januła J., Kruczyński S., Pawlak G., Kintop M.: komputerowa symulacja procesu wtrysku oleju napędowego i oleju rzepakowego z wykorzystaniem programu AVL FIRE. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowa. 10/2011.
5. Kołodziej Sz.: Analiza porównawcza parametrów pracy silnika ZI w badaniach eksperymentalnych i symulacyjnych. Autobusy. Eksploatacja i testy. 6/2017.
6. Kuszewski H., Lejda K.: Zwiększenie efektywności rozpylenia paliwa rzepakowego przez modyfikację układu zasilania silnika ZS. MOTROL, 2006.
7. Mazanek A.: Ocena parametrów użytkowych wtryskiwaczy piezoelektrycznych na podstawie badań wizualizacyjnych procesu rozpylenia paliwa. NAFTA-GAZ 2016.
8. Rudnicki J., Ochał N.: Stanowisko do badania wtryskiwaczy w warunkach zasilania silnika paliwami modyfikowanym. Journal of Polish CIMEEAC, Vol.13 No1/12, Gdańsk 2018.
9. 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, Gdańsk 2017.
10. Skowron M., Pielecha I.: Analiza porównawcza rozpylenia paliwa przez wybrane typy wtryskiwaczy paliw ciekłych. Logistyka 2015.
11. Sowa K., Siuta T.: Porównawcze badania wizualizacyjne strug paliwa wpływających z wtryskiwaczy klasycznego i doświadczalnego. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, Nr 5/2003, Lublin 2003.
12. Stobnicki P.: Badawcza analiza wtrysku paliwa w aspekcie właściwości ekologicznych silnika o zapłonie samoczynnym. Rozprawa doktorska PP, Poznań 2013.
13. Szlachta Z., Kuszewski H.: Parametry strug paliwa tworzonych przez wtryskiwacz klasyczny i z obrotowo-zwrotnym ruchem iglicy. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, Nr 5/2003, Lublin 2003.
14. <https://www.sony.pl>
15. <https://www.orlen.pl/PL/DlaBiznesu/Paliwa/OlejeNapadowe/Strony/OlejNapadowyEkodieselUItra.aspx>
16. <http://www.datatranslation.co.uk/gb/software/test-and-measurement-software/quickdaq/data-logger,1397.html?merk=a560ff3b7dcdaefa78908a2b61b55f32>
17. <http://www.peltier.pl/budowa.html>
18. <http://kryothermtec.com/standard-single-stage-thermoelectric-coolers.html>