

Use of standard computer packages in the analysis of the fuel injection process

Abstract: This paper presents the results of level analysis of the possibility of using Microsoft Excel and Matlab as a tool useful in the analysis of the fuel injection. Measurements included bench testing common rail injection system. Recorded voltage waveforms of control signals generated by the injectors and pressure sensor. Then, after an analysis of selected methods of filtration, as a tool for treatment of interference waveforms, Chebyshev filter is selected. Analysis of the results showed that the injection will change the fuel pressure in the tank, appropriate to its parameters. In addition, it was found that the used programs allow for the treatment, analysis and presentation of voltage signals underlying the assessment of injection.

Keywords: Diesel engine, Common Rail, divided dose, injection time

Wykorzystanie standardowych pakietów informatycznych w analizie procesu wtrysku paliwa

Streszczenie: W artykule przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania programów Microsoft Excel i Matlab jako narzędzi do analizy wtrysku paliwa. Pomiarzy obejmowały badania stanowiskowe układu wtryskowego common rail. Rejestrowano przebiegi napięciowe sygnałów sterujących wtryskiwaczami oraz sygnały generowane przez fabryczny czujnik ciśnienia umieszczony w zasobniku. Po analizie dostępnych metod filtracji wybrano filtr Czebyszewa, jako narzędzie służące do usuwania zakłóceń ze zmierzonych przebiegów. Analiza wyników badań wykazała, że wtrysk powoduje istotne zmiany ciśnienia paliwa w zasobniku, które można wykorzystać do oceny pracy układu zasilania. Zastosowane ogólnodostępne pakiety informatyczne umożliwiają analizę, jak i prezentację graficzną wyników pomiarów.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, Common Rail, dzielona dawka, czas wtrysku

1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój samochodowych silników o zapłonie samoczynnym, wynika z rozwoju ich układów zasilania w paliwo. Chodzi tu przede wszystkim o zasobnikowe systemy, powszechnie znane pod nazwą common rail. Ich zalety są dobrze znane i doceniane, stąd stosunkowo duża liczba rozwiązań, wersji i wariantów konstrukcyjnych.

Zasobniki tych systemów są wykonywane w kształcie grubościennej rury, z promieniowo rozłożonymi króćcami połączeń przewodów wtryskowych. Przede wszystkim mają zapewnić zgromadzenie, odpowiedniej, dla wszystkich warunków pracy silnika, ilości paliwa. Konieczne jest zarówno zapewnienie możliwie krótko trwającego procesu rozruchu, jak i właściwej pracy silnika podczas gwałtownego przyspieszania czy biegu luzem. Wspomniane stany znacząco różnią się pod względem wymaganej przez silnik ilości paliwa. To z kolei, z uwagi na konieczność zapewnienia żądanych parametrów pracy silnika, wymaga zapewnienia różnych wartości ciśnienia paliwa w zasobniku. Ponadto, ze względu na potrzebę precyzyjnego sterowania dawką i czasem wtrysku, istnieje wymóg ciągłego monitorowania wartości ciśnienia. Dlatego w zasobnikach, które zawsze są montowane blisko wtryskiwaczy, instaluje się czujniki

i regulatory ciśnienia paliwa. Dzięki temu w sposób ciągły zapewniony jest wpływ na ten bardzo istotny parametr pracy systemu zasilania w paliwo.

2. Cel analiz

Z uwagi na znaczącą liczbę wyprodukowanych i eksploatowanych układów zasilania typu common rail, ciągle aktualne pozostaje zagadnienie jego wiarygodnej i szybkiej diagnostyki. Dotyczy to zarówno części hydraulicznej, jak i elektrycznej. W pracy [7] zaproponowano ocenę wtryskiwaczy w oparciu o strumienie paliwa wypływającego z ich przelewów. Inne, czasem bardziej precyzyjne informacje można uzyskać za pomocą analizy sygnałów elektrycznych. Dotyczy to zwłaszcza czujnika ciśnienia paliwa w zasobniku jako ważnej wielkości decydującej o prawidłowym funkcjonowaniu jednostki napędowej.

W literaturze przedmiotu można spotkać wyniki analiz pracy zasobnikowego układu zasilania, których podstawą były przebiegi ciśnienia w zasobniku. Niektóre, rozbudowane, powstały w oparciu o modele sygnałów i procesów zachodzących w układzie zasilania [3]. Inne w większości bazują na krótkoczasowej (STFT), dyskretnej transformacji Fouriera (DFT) [8] bądź szybkiej transformacji Fouriera [6]. Można również

napotkać zgłoszenia patentowe [11] opisujące systemy diagnostyczne, których działanie jest oparte o sygnał ciśnienia.

Celem poznawczym niniejszego artykułu była analiza przebiegów ciśnienia paliwa w zasobniku, wywołanych wtryskiem dzielonej i niedzielonej dawki paliwa. Ponadto podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, czy napięciowy sygnał elektryczny zarejestrowany za pomocą fabrycznego przetwornika ciśnienia może stanowić podstawę szybkiej diagnostyki układu.

Zainteresowanie autorów wspomnianą problematyką wynika z pewnego niedosytu powstającego w przypadkach, gdy była konieczna uproszczona ocena diagnostyczna układu, a pomiary przelewów nie dawały jednoznacznych odpowiedzi czy wskazań.

Celem użytecznym pracy była ocena możliwości stosowania gotowych pakietów informatycznych do analizy pracy układu wtryskowego typu Common Rail.

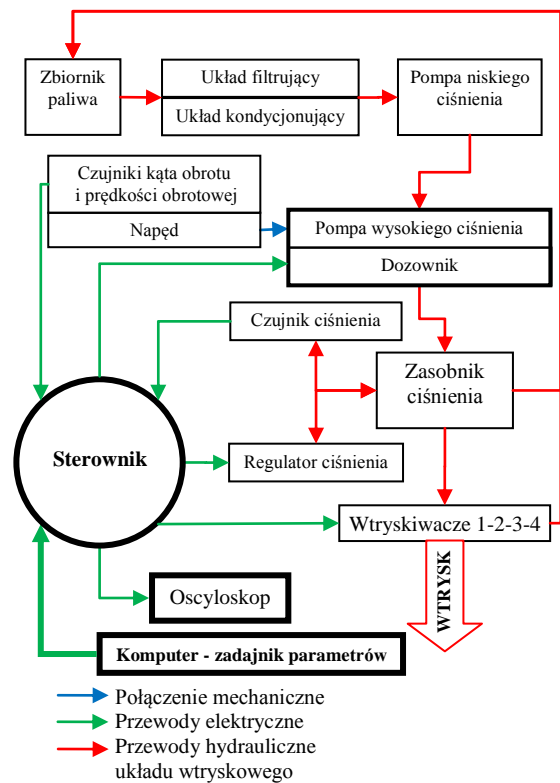
3. Obiekt analiz i stanowisko badawcze

Czujnik ciśnienia wykorzystywany jest w celu ciągłego monitorowania ciśnienia paliwa panującego w zasobniku. Składa się ze stalowej membrany, której odkształcenia pod wpływem zmieniającego się ciśnienia, powodują zmianę oporu w obwodzie mostka pomiarowego. Wartość odkształcenia wynosi około 20 μm przy ciśnieniu 150 MPa. Czujnik jest zasilany napięciem o wartości 5 V, a sygnał wyjściowy zmieniający się od 0 do 80 mV jest wzmacniany maksymalnie do wartości napięcia zasilania. Tak uzyskana wartość jest przesyłana do modułu sterującego pracą silnika. Ciśnienie paliwa jest regulowane w pętli sprzężenia zwrotnego i pozostaje w przybliżeniu stałe, niezależnie od prędkości obrotowej i obciążenia silnika. Zmiany ciśnienia wywołane zmianami dawkowania są kompensowane przez modyfikację położenia sterujących elementów wykonawczych, to jest zaworu regulacyjnego w zasobniku i/lub dławiącego w pompie wysokiego ciśnienia [1].

Pomiary obejmowały badania stanowiskowe na stole probierczym, na którym zabudowano układ zasilania silnika o zapłonie samoczynnym, stosowany w samochodzie osobowym średniej klasy (rys. 1). Wykorzystano fabrycznie zabudowany przetwornik ciśnienia o maksymalnej wartości roboczego ciśnienia 180 MPa i dokładności pomiaru $\pm 2\%$ tej wartości. Pracą układu wtryskowego zarządzał sterownik współpracujący z komputerem. Układ ten umożliwiał: podział dawki na części, wybór kolejności pracy wtryskiwaczy, zadawanie początku i czasu trwania wtrysku poszczególnych części dawki. Programowanie pracy układu Common Rail odbywało się na poziomie komputera sterującego.

Zmierzone na przyłączy czujnika napięciowe przebiegi zmian ciśnienia, rejestrowano na jednym

z kanałów oscyloskopu cyfrowego Tektronix TDS-3014. Za pomocą trzech pozostałych kanałów zapisywano napięciowe przebiegi sterujące pracą wtryskiwaczy. Stanowiły one podstawę do wyznaczenia czasów wtrysku oraz charakterystycznych wielkości związanych z przebiegiem wtrysku dzielonej dawki.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego.

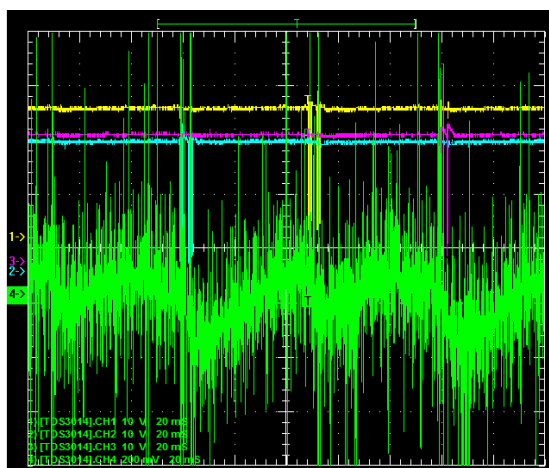
4. Metodyka pomiarów i analiz, program badań

Większość działających na rynku motoryzacyjnym stacji kontroli i napraw pojazdów posiada na swoim wyposażeniu urządzenia diagnostyczne, w skład których wchodzi oscyloskopy. Są one w większości przypadków używane według określonych procedur, ustalonych przez producentów samochodów. Wprawny diagnosta, bazujący tylko na swym doświadczeniu, potrafi wykorzystać oscyloskopy do szybkiej oceny wybranych elementów osprzętu silnika. Jednak w większości przypadków nie można wprost wykorzystać zmierzonych za pomocą oscyloskopu przebiegów do sprawdzania czujników, urządzeń czy analizy zjawisk. Są bowiem obciążone szumami i zakłóceniami wynikającymi z drgań mierzonych obiektów fizycznych, warunków i nastaw pomiarowych lub stanu technicznego przewodów łączących sondę z oscyloskopem. Mając powyższe na uwadze, podczas wykonywania pomiarów na potrzeby niniejszych rozważań zachowywano warsztatowe, a nie laboratoryjne warunki prowadzenia prac. Na przykład użyto standardowych przewodów łączących,

zamiast laboratoryjnych, wyselekcjonowanych. Miało to oczywiście wpływ na poziom szumów mierzonych sygnałów, a w związku z tym i na metodykę postępowania podczas prowadzenia analizy sygnału. Mierzono zarówno pojedyncze przebiegi (sample), jak i uśrednione z 64 i 512 przebiegów.

W celu wyznaczenia zmian ciśnienia w zasobniku układu wtryskowego stosowano metodykę, na którą składały się z następujące etapy:

- rejestracja sygnału napięciowego z przetwornika ciśnienia umieszczonego w zasobniku,
- konwersja i zapis przebiegów z wykorzystaniem pakietu WaveStar 2.4 firmy Tektronix,
- konwersja i zapis przebiegów do standardu Microsoft Excel,
- filtracja przebiegów za pomocą pakietów Microsoft Excel lub Matlab,
- analiza czasów i parametrów wtrysku za pomocą pakietów Microsoft Excel lub Matlab,
- tabelaryczna oraz graficzna prezentacja wyników za pomocą pakietów Microsoft Excel lub Matlab.



Rys. 2. Przykład pojedynczego przebiegu ciśnienia dzielonej dawki (kolor zielony - przebieg ciśnienia, kolor niebieski – sygnał sterujący drugiego wtryskiwacza, kolor żółty – sygnał sterujący pierwszego wtryskiwacza, kolor różowy - sygnał sterujący trzeciego wtryskiwacza)

Każdy przebieg zawierał zarejestrowane wartości napięcia w zależności od czasu i składał się z 10000 par wartości. Krzywe uzyskiwane z pomiarów nie są gładkie, a niektóre obciążone licznymi zakłóceniami i wysokim poziomem szumów. Wprowadza to pewne niezgodności i utrudnienia generujące błędy. Dlatego przeprowadzono analizę metod filtracji sygnału (p. 5) i wybrano jedną z nich. Następnie wszystkie zmierzone przebiegi ciśnienia przefiltrowano, dobierając parametry filtra odpowiednio do każdego przypadku pomiarowego. Tak przetworzone dane poddane zostały analizie, której wyniki przedstawiono w punkcie 6.

Tab. 1. Program badań

przypadek	zadany czas przerwy części dawki [μs]	przerwa pomiędzy pierwszą, a drugą częścią [μs]	zadany czas drugiej części dawki [μs]	ciśnienie paliwa w kolektorze [bar]	kolejność pracy wtryskiwaczy
1	-	-	1360	681	1-3-4-2
2	1500	700	1360	670	1-3-4-2
3	1500	2000	1360	661	1-3-4-2
4	-	-	1360	373	1-3-4-2

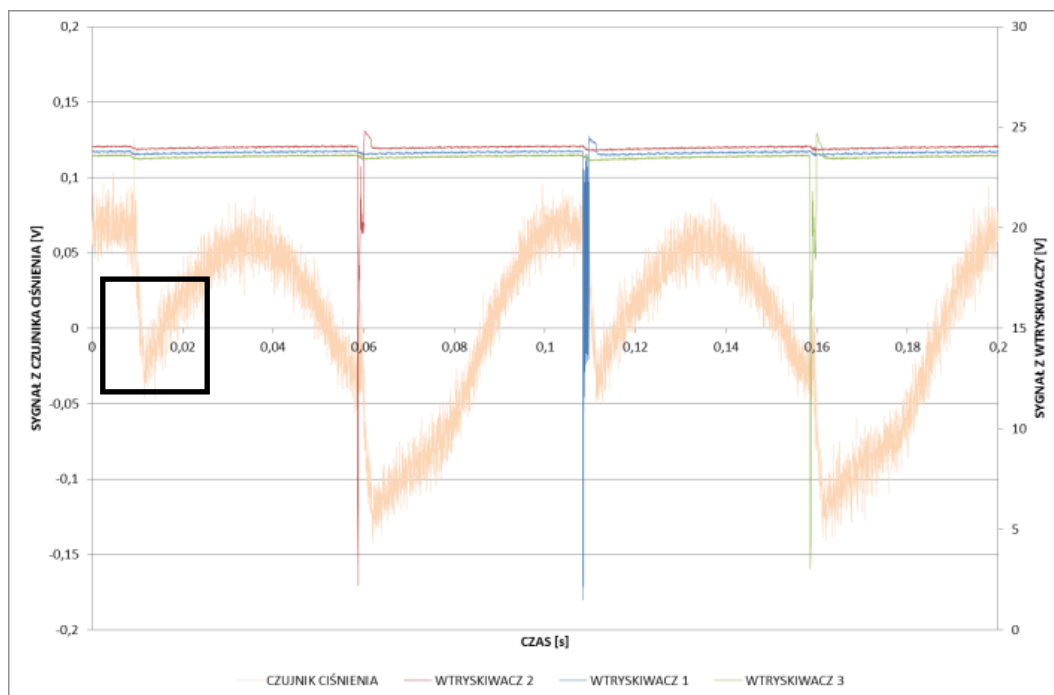
Program badań składa się z 4 różnych przypadków pomiarowych, których podstawowe wielkości charakterystyczne zestawiono w tabeli 1. Z uwagi na wstępny charakter pomiarów, zadawano duże wartości czasów wtrysku, w celu uzyskania wyraźnego obrazu dawkowania na przebiegu ciśnienia. W każdym przypadku rejestrowano zarówno pojedyncze przebiegi, jak i uśrednione, z 64 i 512 cykli.

Autorzy nie dysponowali dokładną charakterystyką badanego czujnika. Z tego powodu analizy zmian ciśnienia w zasobniku oparto o napięciowe przebiegi generowane przez wspomniany czujnik.

5. Analiza metod filtracji sygnału

Już pierwsze oceny zarejestrowanych przebiegów potwierdziły konieczność wprowadzenia procedury filtracji. Wybór metody oczyszczania sygnałów z zakłóceń oparto o analizę dokładności odwzorowania przebiegu ciśnienia w zasobniku, zarejestrowanego przy podawaniu jednoczesnej dawki wtrysku (rys. 3). Poszukiwania narzędzia do przeprowadzenia tej operacji rozpoczęto od pakietu Microsoft Excel. Ma on wbudowane procedury umożliwiające dodawanie do analizowanych przebiegów linii trendu, a w niej jedną z opcji jest możliwość zastosowania średniej ruchomej. Jednak wprowadzenie wprost takiego postępowania nie umożliwia uzyskania wartości liczbowych uśrednianego przebiegu. Wykorzystano więc możliwość obliczenia wartości średnich za pomocą podobnej opcji, dostępnej w dodatku Analysis ToolPak. Można w niej zmieniać czas uśredniania (nazwany tutaj odstępem), zadając liczbę wartości, która ma zostać uwzględniona w procesie uśredniania. Jak wiadomo [5], operacja ta powoduje opóźnienie czasowe (przesuwanie się ekstremów), które zawsze jest mniejsze od czasu uśredniania oraz „wygładzanie” przebiegu tym większe, im dłuższy jest czas uśredniania.

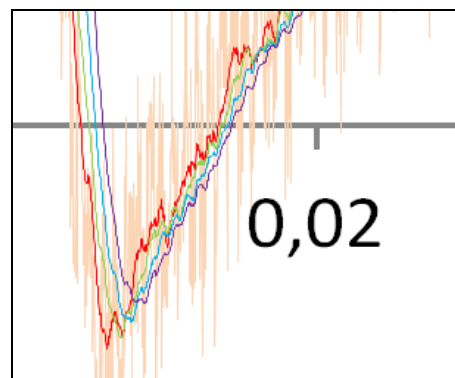
Na rys. 4 zawarto wybrany fragment przebiegu ciśnienia w zasobniku przedstawionego na rys. 3. Obejmuje on lokalne ekstremum, wywołane podaniem dawki paliwa przez drugi wtryskiwacz.



Rys. 3. Przebiegi sterujące wtryskiwaczy oraz ciśnienia w zasobniku zarejestrowane przy podawaniu jednoczesnej dawki wtrysku

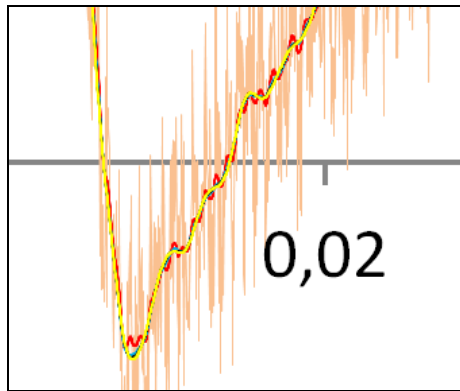
Na tle zmierzonego, przedstawiono cztery przebiegi utworzone dla czterech wartości czasu uśredniania (odstępów) równych 25 (linia koloru czerwonego), 50 (linia koloru zielonego), 75 (linia koloru niebieskiego) oraz 100 (linia koloru fioletowego) okresów. Wyraźnie widać występowanie wspomnianego wyżej opóźnienia czasowego i zmianę wartości lokalnego ekstremum. Im większa jest liczba okresów użyta do obliczenia średniej, tym większa jest wartość opóźnienia i mniejsze wartości sygnału z czujnika ciśnienia. Dlatego metoda średniej ruchomej choć może być używana do „wygładzania” przebiegów i ich oceny jakościowej, nie nadaje się do oceny ilościowej. Z tego powodu nie została uwzględniona w dalszych analizach sygnałów ciśnienia.

Należało poszukać innej metody usuwania zakłóceń i szumów. Powszechnie uważa się, że istnieje duże podobieństwo między uśrednianiem, a filtracją sygnału. Jednak różnice są dość istotne, zwłaszcza dla filtrów wyższych rzędów. Umiejętnie dobrany filtr pozwala uniknąć omówionych wcześniej wad procesu uśredniania i może być łatwo dopasowany do wymagań użytkownika. Po przeprowadzeniu analizy dostępnego oprogramowania, wybrano środowisko Matlab. Można w nim stosunkowo prosto zaimplementować filtr działający według określonej procedury. Do operacji filtracji sygnałów z czujnika ciśnienia wybrano dolnoprzepustowe filtry Butterwortha i Czebyszewa.

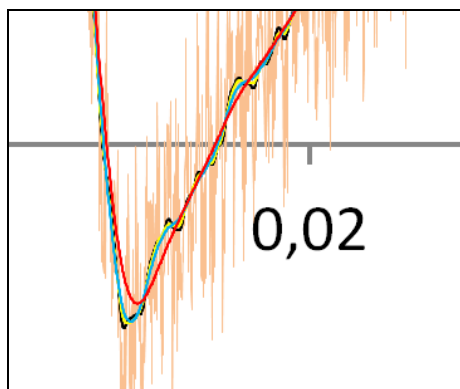


Rys. 4. Sygnał z czujnika ciśnienia uśredniony za pomocą średnich ruchomych z 25, 50, 75 i 100 odstępów

Jakość filtracji filtra Butterwortha można zmieniać za pomocą dwóch parametrów: rzędu filtra i częstotliwość odcięcia. W celu znalezienia najlepszego zestawienia tych dwóch wielkości, utworzono 16 zbiorów liczbowych po 10000 wartości każdy, dla kombinacji rzędów (1, 2, 3, 4) oraz częstotliwości odcięcia (500, 1000, 1500, 2000 Hz). Użytkane dane zapisano w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel oraz w postaci wykresów. Rys. 5 i 6 przedstawiają wpływ rzędu filtra i częstotliwości odcięcia na analizowany przebieg.



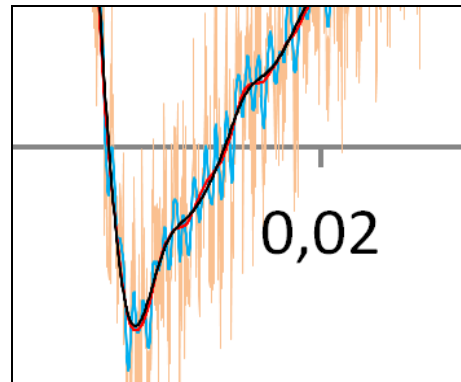
Rys. 5. Wpływ rzędu filtra Butterworth'a na jakość filtracji (kolor czerwony – rząd 1, kolor niebieski – rząd 2, kolor czarny – rząd 3, kolor żółty – rząd 4; częstotliwość odcięcia 1500 Hz)



Rys. 6. Wpływ częstotliwości odcięcia filtra Butterworth'a na jakość filtracji (kolor czerwony – 500 Hz, kolor niebieski – 1000 Hz, kolor żółty – 1500 Hz, kolor czarny – 2000 Hz; rząd 2)

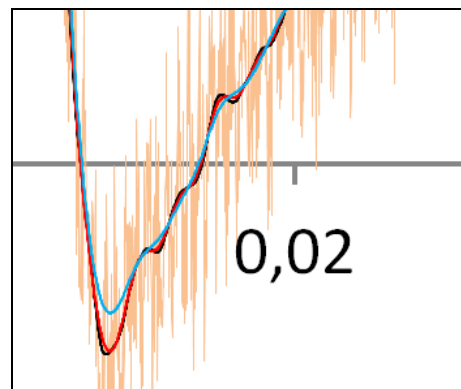
Podstawową zaletą filtra Butterworth'a, w porównaniu ze średnią ruchomą, jest brak przesunięcia fazowego. Jak widać na rys. 5, zwiększanie rzędu filtra dla tej samej częstotliwości odcięcia, powoduje wygładzenie krzywej, a także zmniejsza dokładność odwzorowania analizowanego przebiegu. Podczas analizy wyników pomiarów stwierdzono, że parametr ten ma swoją wartość graniczną, powyżej której otrzymuje się już zniekształcone wyniki. w przypadku częstotliwości odcięcia - rys. 6 - zauważono, że wzrost tej wartości powoduje dokładniejsze odwzorowanie filtrowanego przebiegu, jednak uzyskana krzywa staje się mniej gładka.

Widać zatem, że jakość filtracji za pomocą filtra Butterworth'a zależy od jego parametrów. Po przeprowadzeniu graficznej analizy wyników stwierdzono, że do dalszej analizy przebiegów ciśnienia, w zależności od przypadku pomiarowego, można wykorzystać filtry o częstotliwości odcięcia 1500 Hz oraz rządach 2, 3 lub 4. Przebiegi uzyskane po operacji filtracji filrami o tych parametrach, odznaczały się optymalnym odwzorowaniem sygnału, przy zachowaniu niewielkich fluktuacji charakterystycznych dla tych pomiarów.



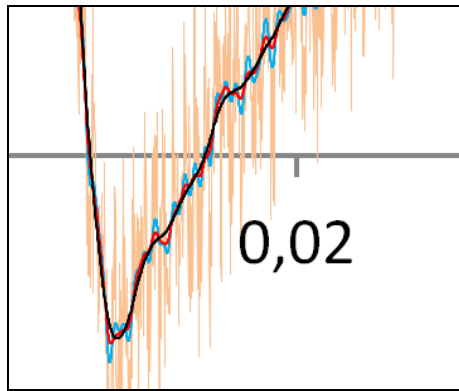
Rys. 7. Wpływ rzędu filtra Czebyszewa na jakość filtracji (kolor niebieski – rząd 1, kolor czerwony – rząd 2, kolor czarny – rząd 3; częstotliwość odcięcia 600 Hz, falistość 0,1 dB)

Środowisko Matlab umożliwia również wykorzystanie filtra Czebyszewa. W tym przypadku za jakość filtracji są odpowiedzialne trzy wielkości: rząd, częstotliwość odcięcia oraz falistość. Na potrzeby oceny możliwości zastosowania tego rodzaju filtra do analizy sygnałów przebiegu ciśnienia utworzono 27 zbiorów, po 10000 par wartości każdej, dla kombinacji rzędów (1, 2, 3), falistości (0,01, 0,1, 1 dB) i częstotliwości odcięcia (300, 600, 900 Hz). Uzyskane dane zapisano w skoroszycie programu MS Excel. Na rys. 7÷9 przedstawiono wpływ poszczególnych parametrów na jakość filtracji.



Rys. 8. Wpływ falistości filtra Czebyszewa na jakość filtracji (kolor niebieski – 1 dB, kolor czerwony – 0,1 dB, kolor czarny – 0,01 dB; częstotliwość odcięcia 900 Hz, rząd 3)

Podobnie jak w przypadku filtra Butterworth'a nie występuje tu opóźnienie czasowe. Przy zwiększaniu rzędu filtra maleje amplituda fluktuacji, natomiast dokładność odwzorowania zmian przebiegu nieznacznie zmniejsza się (rys. 7). Podobną tendencję można zaobserwować w przypadku falistości (rys. 8). Inaczej jest w przypadku częstotliwości odcięcia. Wzrost jej wartości powoduje zwiększenie dokładności odwzorowania przebiegu oraz zmniejsza jego wygładzenie (rys. 9).



Rys. 9. Wpływ częstotliwości odcięcia filtra Czebyszewa na jakość filtracji (kolor niebieski – 900 Hz, kolor czerwony – 600 Hz, kolor czarny – 300 Hz; falistość 0,01 dB, rząd 2)

Z uwagi na większą ilość parametrów wpływających na proces filtracji, do analizy sygnałów z czujnika ciśnienia w zasobniku wybrano właśnie filtr Czebyszewa. Po przeprowadzeniu procesów filtracji różnych przypadków pomiarowych stwierdzono, że dobierając parametry filtru, każdy z przypadków należy traktować indywidualnie, jednak analizę należy rozpocząć od następujących wartości: rząd 3, falistość 0,1 dB, częstotliwość odcięcia 900 Hz.

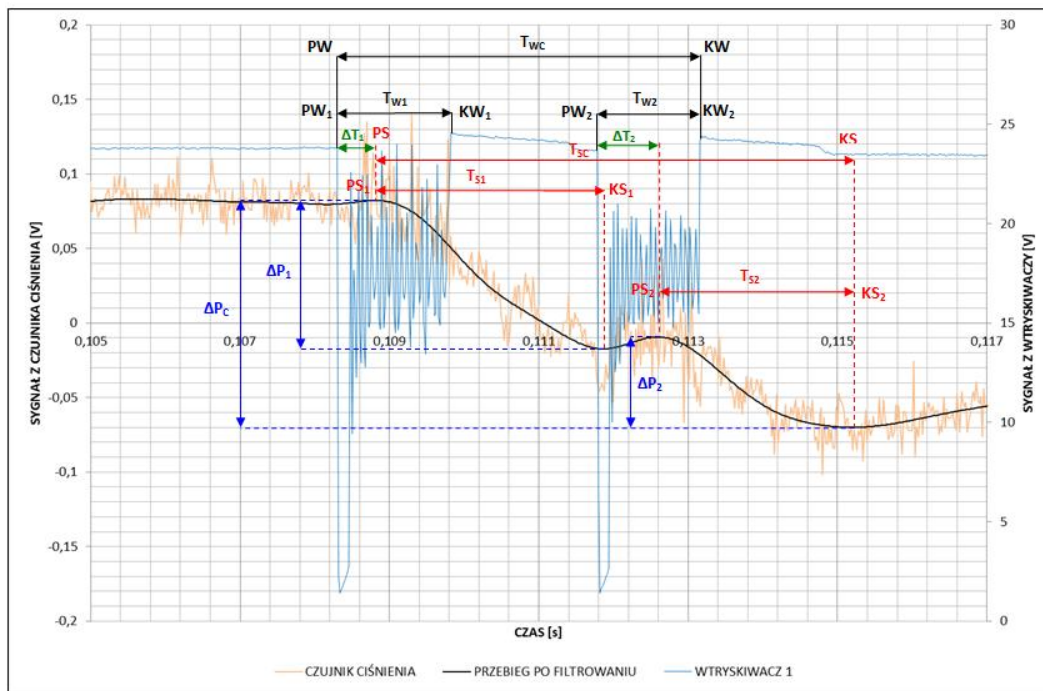
6. Analiza wyników badań

Przedstawione w programie badań przypadki zostały poddane dokładnej analizie, w celu wyznaczenia zależności pomiędzy sygnałem sterującym wtryskiwaczem, a zmianą ciśnienia w zasobniku paliwa. Poniżej, w oparciu o trzeci przypadek pomiarowy, przedstawiono kolejne kroki analizy oraz wielkości wyznaczone z zarejestrowanych przebiegów ciśnienia w zasobniku i sygnałów sterujących wtryskiwaczami.

Wykresy zmian ciśnienia w zasobniku, sygnałów sterujących wtryskiwaczami oraz krzywe powstałe w wyniku filtracji zostały sformatowane tak, aby: przedstawiały proces wtrysku drugiego wtryskiwacza. Dodatkowo na wykresie naniesiono siatkę ułatwiającą odczytanie wartości czasu i napięcia. Odczytywano wartości następujących wielkości (rys. 10):

- **PW** – początek zadawania sygnału sterującego = 0,10830 s,
- **KW** – koniec zadawania sygnału sterującego = 0,11316 s,
- **PW₁** = **PW** – początek zadawania sygnału sterującego dla pierwszej części dawki = 0,10830 s,
- **KW₁** – koniec zadawania sygnału sterującego dla pierwszej części dawki = 0,10982 s,
- **PW₂** – początek zadawania sygnału sterującego dla drugiej części dawki = 0,11178 s,
- **KW₂** = **KW** – koniec zadawania sygnału sterującego dla drugiej części dawki = 0,11316 s,

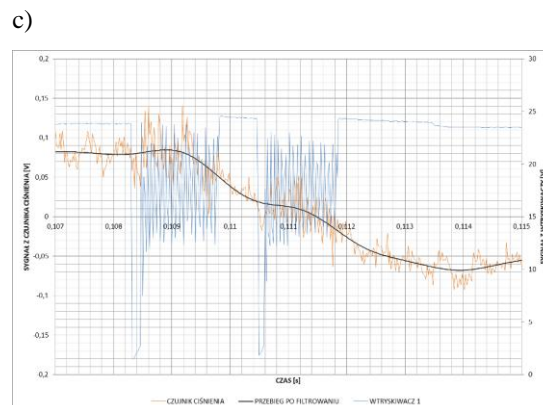
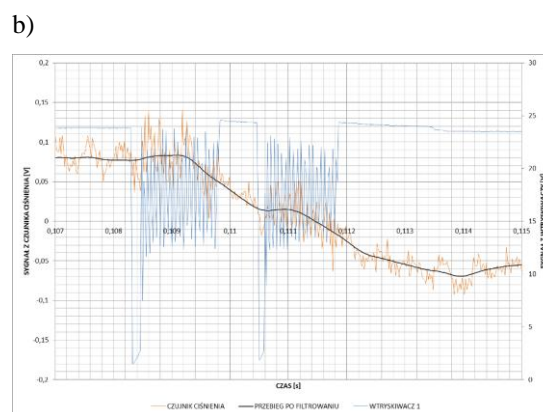
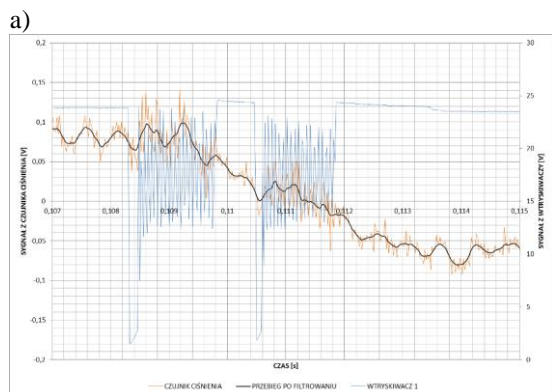
- **T_{wc}** = **KW** – **PW** – całkowity czas zadawania sygnału sterującego = 0,00486 s,
- **T_{w1}** = **KW₁** – **PW₁** – czas zadawania sygnału sterującego dla pierwszej części dawki = 0,00152 s,
- **T_{w2}** = **KW₂** – **PW₂** – czas zadawania sygnału sterującego dla drugiej części dawki = 0,00138 s,
- **T_p** = **PW₂** – **KW₁** – czas przerwy między kolejnymi częściami dawki (obszar między **KW₁**, a **PW₂** – nie zaznaczono na wykresie) = 0,00196 s,
- **PS** – początek spadku ciśnienia wywołanego wtryskiem = 0,10880 s,
- **KS** – koniec spadku ciśnienia wywołanego wtryskiem = 0,11518 s,
- **PS₁** = **PS** – początek spadku ciśnienia wywołany wtryskiem pierwszej części dawki = 0,10880 s,
- **KS₁** – koniec spadku ciśnienia wywołany wtryskiem pierwszej części dawki = 0,11186 s,
- **PS₂** – początek spadku ciśnienia wywołany wtryskiem drugiej części dawki = 0,11260 s,
- **KS₂** = **KS** – koniec spadku ciśnienia wywołany wtryskiem drugiej części dawki = 0,11518 s,
- **T_{sc}** = **KS** – **PS** – całkowity czas zmian ciśnienia wywołanych wtryskiem = 0,00638 s,
- **T_{s1}** = **KS₁** – **PS₁** – czas spadku ciśnienia wywołany wtryskiem pierwszej części dawki = 0,00306 s,
- **T_{s2}** = **KS₂** – **PS₂** – czas spadku ciśnienia wywołany wtryskiem drugiej części dawki = 0,00258 s,
- **T_{sp}** = **PS₂** – **KS₁** – czas przyrastania ciśnienia odpowiadający przewie pomiędzy kolejnymi częściami dawki (obszar pomiędzy **KS₁**, a **PS₂** – nie zaznaczono na wykresie) = 0,00074 s,
- **ΔP_c** – całkowity spadek ciśnienia wywołany wtryskiem = 0,1522 V,
- **ΔP₁** – spadek ciśnienia wywołany wtryskiem pierwszej części dawki = 0,0995 V,
- **ΔP₂** – spadek ciśnienia wywołany wtryskiem drugiej części dawki = 0,0606 V,
- **ΔP_p** – przyrost ciśnienia zarejestrowany podczas przerwy między kolejnymi częściami dawki (obszar pomiędzy początkiem **ΔP₂**, a końcem **ΔP₁** – nie zaznaczono na wykresie) = 0,00795 V,
- **ΔT₁** = **PS₁** – **PW₁** = - zwłoka czasowa między początkiem sygnału sterującego pierwszej części dawki, a spadkiem ciśnienia = 0,00050 s,
- **ΔT₂** = **PS₂** – **PW₂** = - zwłoka czasowa między początkiem sygnału sterującego drugiej części dawki, a spadkiem ciśnienia = 0,00082 s,
- **ΔT₃** = **KS₁** – **KW₁** = - zwłoka czasowa między końcem sygnału sterującego pierwszej części dawki, a wzrostem ciśnienia (obszar między **KW₁**, a **KS₁** – nie zaznaczono na wykresie) = 0,00204 s,
- **ΔT₄** = **KS₂** – **KW₂** = - zwłoka czasowa między końcem sygnału sterującego drugiej części dawki, a wzrostem ciśnienia (obszar między **KW₂**, a **KS₂** – nie zaznaczono na wykresie) = 0,00202 s.



Rys. 10. Przykład przebiegu ciśnienia dwuczęściowego wtrysku z zaznaczonymi charakterystycznymi wielkościami

Między sygnałem sterującym wtryskiwaczem, a przebiegiem napięciowym z czujnika ciśnienia występuje pewna zwłoka czasowa. Dla analizowanego przypadku zwłoka między początkiem sygnału sterującego, a rozpoczęciem spadku ciśnienia wynosi: 500 μ s dla pierwszej części dawki i 800 μ s dla drugiej. Wyznaczone na podstawie przebiegu opóźnienie pomiędzy końcem sygnału sterującego, a ponownym wzrostem ciśnienia w zasobniku wynosi około 2000 μ s niezależnie od części wtrysku. Obliczone czasy spadków ciśnienia są zdecydowanie dłuższe aniżeli długość przebiegów sterujących wtryskiwaczami ($T_{WC} = 4860 \mu$ s \ll $T_{SC} = 6380 \mu$ s).

W rozpatrywanym przypadku, z uwagi na długą przerwę pomiędzy kolejnymi częściami dawki, doskonale widać chwilowy wzrost ciśnienia między końcem spadku pierwszej, a początkiem wtrysku drugiej części dawki.



Rys. 11. Analiza procesu wtrysku dwuczęściowej dawki z zastosowaniem różnych rzędów filtra Czebyszewa: a) rząd filtra 1, b) rząd filtra 2, c) rząd filtra 3.

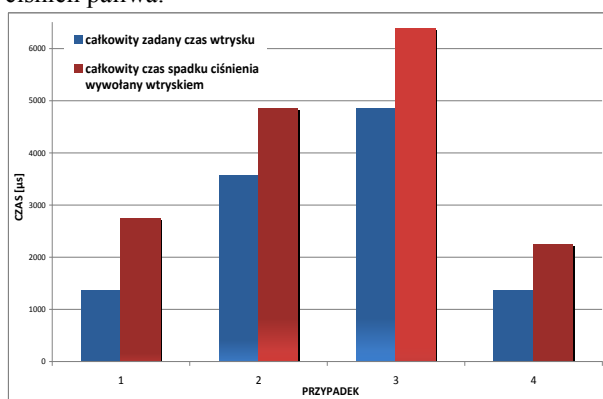
W czasie 740 μs , napięcie zarejestrowane przez czujnik ciśnienia wzrosło o 0,00795 V. Całkowite zmniejszenie napięcia podczas wtrysku wyniosło 0,1522 V - w pierwszej części 0,0996 V, a w drugiej 0,0606 V. Sumując te dwie wartości oraz korygując o przyrost napięcia wynikający ze wzrostu ciśnienia z tytułu z przerw pomiędzy kolejnymi częściami dawki, otrzymuje się wynik zgodny z ΔP_C .

W podobny sposób przeanalizowano wszystkie przypadki pomiarowe, zarówno pojedyncze, jak i uśrednione z 64 i 512 przebiegów. Dla niektórych była konieczna zmiana parametrów filtracji, jak przedstawiono dla dwuczęściowej dawki o danym czasie przerwy 700 μs (rys. 11).

Widać, że zastosowanie dotychczas wykorzystwanego filtra rzędu 3 nie daje jednoznacznych wskazówek co do przebiegu zmian ciśnienia. Dopiero utworzenie wykresów z zastosowaniem filtrów pierwszego i drugiego rzędu, umożliwia ocenę i analizę procesu wtrysku.

Czasy wtrysku poszczególnych części dawki (T_{W1} , T_{W2} , T_{WC}) wyznaczone w oparciu o przebiegi sterujące, różnią się od zadanych od 1,3 do 1,9 %, co świadczy o prawidłowej pracy sterownika.

Zadane za pomocą sterownika czasy wtrysku są mniejsze od wywołanych nimi czasów spadku ciśnienia w zasobniku (rys. 12). Dla ciśnienia paliwa w zasobniku około 67 MPa, utrzymywanego dla trzech przypadków pomiarowych, całkowity czas spadku ciśnienia był o 1400 μs większy od zadanego czasu wtrysku. Z kolei dla czwartego przypadku (ciśnienie w zasobniku 37,3 MPa) był większy o 900 μs . Są to wartości bardzo zbliżone do uzyskanych we wcześniejszych badaniach, które prowadzono z wykorzystaniem elektronicznie sterowanego indykatora dawki wtrysku [8]. Różnice wynikają w głównej mierze z wartości stosowanych ciśnień paliwa.

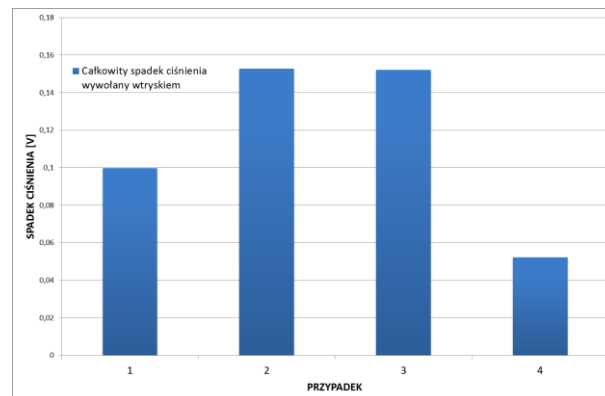


Rys. 12. Porównanie całkowitego zadanego czasu wtrysku i całkowitego czasu spadku ciśnienia w zasobniku

Odwrotna sytuacja ma miejsce dla czasów przerw między kolejnymi częściami dawki. Obserwowane na przebiegach okresy wzrostu ciśnienia spowodowane przerwami, są zdecydowanie mniej-

sze od zadanego czasu przerwy. Wydłużenie czasów zmniejszania ciśnienia odbywa się kosztem przerw między częściami dawki.

Zmniejszenie ciśnienia w zasobniku wywołane wtryskiem paliwa ΔP zależy w głównej mierze od zadanego czasu wtrysku i ciśnienia paliwa (rys. 13). Maksymalne spadki zarejestrowano dla wtrysku dwuczęściowego, gdzie wtryskiwano największą dawkę paliwa. Spadki ciśnienia dla pierwszej części dawki były zdecydowanie większe niż dla drugiej. W przypadku wtrysków jednoczęściowych, realizowanych przy niższych ciśnieniach, spadek ciśnienia był zdecydowanie mniejszy.



Rys. 13. Porównanie spadków ciśnienia w zasobniku wywołanych wtryskiem paliwa

7. Uwagi końcowe

Mimo wysokiego w niektórych przypadkach poziomu szumów i zakłóceń, pomiary szybkozmiennego ciśnienia wykorzystujące sygnał z fabrycznego czujnika umieszczonego w zasobniku układu wtryskowego common rail, można wykorzystać do wstępnej, szybkiej diagnostyki tego układu. Do ich realizacji konieczny jest oscyloskop, a z uwagi na wygodę prowadzenia pomiarów i łatwość analizy wyników, także komputer z właściwym oprogramowaniem.

Przeprowadzenie diagnostyki jest znacznie ułatwione, gdy następuje równoczesna rejestracja przebiegu ciśnienia i sygnałów sterujących wtryskiwaczami. Te ostatnie umożliwiają wyznaczenie charakterystycznych punktów odniesienia w dziedzinie czasu.

Niezmiernie ważne jest ustalenie optymalnych parametrów filtracji sygnału. Decyduje to o dokładności odwzorowania krzywej zmian ciśnienia w zasobniku.

Charakterystyki fabrycznych czujników ciśnienia nie są powszechnie dostępne. Dlatego w artykule przedstawiono analizy zmian ciśnienia w zasobniku oparte o napięciowe przebiegi generowane przez wspomniane czujniki. Z tego powodu jest możliwa jedynie jakościowa ocena zmian. Niemniej celem pracy było określenie możliwości wykorzystania napięciowego sygnału elektrycznego

do szybkiej diagnostyki wtrysku. Przy takim podejściu istotniejsze od oceny ilościowej stają się relacje między sygnałami sterującymi wtryskiwaczami, a odpowiedzią w postaci zmiany napięcia.

Jak wykazała analiza zmierzonych przebiegów, początki zadawania sygnału sterującego dla poszczególnych części dawki różnią się od odpowiadających im początków spadku ciśnienia o wartość zwłoki czasowej (ΔT_1 , ΔT_2). Podobną prawidłowość dla zakończeń procesów zadawania sygnału i spadku ciśnienia z tym, że dla nich wartości zwłoki czasowej (ΔT_3 , ΔT_4) przyjmują ponad trzykrotnie większe wartości. Wartości różnic zależą od rodzaju zastosowanego wtryskiwacza, układu sterowania oraz ciśnienia w zasobniku.

W przypadkach wieloczęściowego wtrysku, w obszarze zadawanego czasu przerwy, stwierdzono występowanie chwilowego wzrostu ciśnienia. Jest on tym większy, im większa jest wartość czasu przerwy. z uwagi na wstępny charakter prac i wynikającą stąd niewielką liczbę przypadków pomiarowych, nie określono dokładnie wartości czasu przerwy, dla którego przyrost staje się widoczny na przebiegu ciśnienia.

Jakość przewodów i przyłączy użytych do rejestracji sygnału nie ma istotnego znaczenia. W każdym przypadku do przeprowadzenia analizy jest konieczna filtracja sygnału. Jednak zastosowanie wyselekcjonowanych przewodów pozwala na

uproszczenie procedury i skrócenie czasu niezbędego do jej wykonania.

Zastosowanie gotowych, dość powszechnie stosowanych pakietów informatycznych, umożliwiła analizę pracy wtryskiwaczy układu typu common rail.

Przeprowadzona analiza pozwala na stwierdzenie, że jest możliwa ocena wtrysku na podstawie analizy zmian ciśnienia w zasobniku paliwa, zwłaszcza gdy zachodzi konieczność dokonania szybkiej diagnostyki układu zasilania. Każdy wtrysk powoduje widoczny spadek ciśnienia. W przypadku wtrysku wieloczęściowego, po powiększeniu oraz odpowiednim przefiltrowaniu przebiegu, jest możliwe sprawdzenie poprawności pracy wtryskiwacza. Należy także zaznaczyć, że do analizy oprócz sygnału z czujnika ciśnienia są potrzebne napięciowe przebiegi sterujące pracą wtryskiwaczy. Wtedy również podczas procesu dotłaczania paliwa przez pompę, można przypisać spadki ciśnienia do określonych wtryskiwaczy. Także jest możliwe określenie czasów wtrysku oraz spowodowanych nimi spadków ciśnienia, jednak wyniki te mogą obarczone błędami uśredniania i wtedy jest dopuszczalna jedynie ocena jakościowa. Przeprowadzenie dokładnych analiz wiąże się koniecznością wykonania żmudnej pracy analitycznej.

Bibliography/Literatura

- [1] Bosch Robert GmbH. Diesel-Engine Management. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Ciurla A.: Analiza zmian ciśnienia jako metoda oceny wtrysku w zasobnikowym układzie zasilania, Praca dyplomowa, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała 2013.
- [3] Clever S.; Isermann R.: Model-based Fault Detection and Diagnosis for Common-rail Injection Systems, MTZ worldwide Edition: 2010-02.
- [4] Dziubiński M., Walusiak S., Pietrzyk W.: Computerized diagnostic for fuel injection control system, Combustion Engines, 1/2008, s. 25-31.
- [5] Hagel R., Zakrzewski J.: Miernictwo dynamiczne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1984.
- [6] Karczewski M., Koliński K.: Diagnostyka wtryskiwaczy układu common rail na podstawie pomiarów ciśnienia w zasobniku, s 110-122, Zeszyty Naukowe WSOWL 1(159) 2011.
- [7] Knefel T.: Technical assessment of common rail injectors on the ground of overflow bench tests, Eksploatacja i Niezawodność: Maintenance and Reliability 2012 Vol. 14, No. 1, s. 42-53.
- [8] Knefel T.: The evaluation of the characteristic injection times of a multiple fuel dose. Journal of KONES: Powertrain and Transport 2011 vol.18 no. 2 , pp. 205-213.
- [9] Payri F., Lujan J. M., Rizzoni G.: Injection diagnosis through common-rail pressure measurement, Proc. ImechE Vol. 220, 2006, s. 347-357.
- [10] Rydzewski J.: Pomiary oscyloskopowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [11] German patent application DE 10 2009 044 076 A1, Verfahren zur Erkennung von Fehlern bei der Kraftstoffeinspritzung einer Brennkraftmaschine sowie Brennkraftmaschine, Registered 22 September 2009, Published 24 March 2011, Applicant: Technische Universität Darmstadt, Inventors: Rolf Isermann, Sebastian Clever

Mr Tomasz Kniefel, D.Eng – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at University of Bielsko-Biala.

Dr inż. Tomasz Kniefel – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Bialej.



Mr Andrzej Ciurla, – student of the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at University of Bielsko-Biala.

Andrzej Ciurla – student na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno – Humanistycznej w Bielsku - Bialej.

