

## MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA METOD TERMOWIZYJNYCH DO OCENY STANU TECHNICZNEGO WTRYSKIWACZY SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

### Streszczenie

*W artykule przedstawiono metodę polegającą na wykorzystaniu obrazu z kamery termowizyjnej do oceny stanu technicznego wtryskiwaczy stosowanych w układach wtryskowych typu common rail. Badaniom poddano cztery wtryskiwacze, których stan techniczny był znany. Trzy z nich charakteryzowały się często spotykaną usterką – posiadały uszkodzone gniazda zaworu sterującego, jeden z wtryskiwaczy był w pełni sprawny. W celu precyzyjnego ocenienia stanu technicznego, wtryskiwacze zostały przebadane na stole probierczym. W badaniach właściwych posłużono się specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowiskiem badawczym. Podczas pracy wtryskiwaczy w stałym odstępnie czasu mierzono temperaturę korpusu w miejscu występowania zaworu sterującego. Otrzymane wyniki pozwoliły zauważyć szybsze nagrzewanie się w tych miejscach wtryskiwaczy uszkodzonych.*

### WSTĘP

Widoczny w ostatnich latach rozwój motoryzacji spowodował ogromny wzrost udziału pojazdów samochodowych w zanieczyszczeniu środowiska. Liczba pojazdów na świecie w 2010 roku przekroczyła 1 miliard, przy liczbie ludności ok. 7 miliardów. W Polsce w roku 2015 zarejestrowanych było około 23 milionów pojazdów, w roku 1970 było ich 0,5 miliona – zatem około 40 razy więcej.

Silnik spalinowy jest jednym z emiterów zanieczyszczeń środowiska, zwłaszcza jego atmosfery. Obserwowane tendencje rozwoju silników spalinowych związane z następstwami wymogów gospodarowania energią dotyczą ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, której zmniejszenie jest możliwe drogą radykalnego obniżenia zużycia paliwa przez te silniki. Emisja toksycznych składników spalin, w głównej mierze zależy od efektywności spalania paliwa, zależnej od przygotowania i stanu mieszanki palnej. Wtryskiwacz, a przede wszystkim jego rozpylacz, jest elementem bezpośrednio wpływającym na parametry przygotowywanego ładunku. Przez odpowiedni dobór rozpylacza oraz kształtowanie jego parametrów eksploatacyjnych, możliwe jest wpływanie na stan ładunku i w konsekwencji na przebieg spalania paliwa w silniku tłokowym.

Powszechnie dzisiaj stosowany system stryskowy typu common rail (CR) zapewnia korzystniejszy, w porównaniu do pozostałych układów wtryskowych, przebieg wtrysku przy niższych ciśnieniach paliwa ze względu na prostokątny oraz podzielony na dawki przebieg ciśnienia wtrysku, uzyskiwany dzięki utrzymywaniu w zasobniku prawie stałego ciśnienia.

System ten umożliwia dobieranie indywidualnej dawki paliwa do każdego cylindra przy jednoczesnym spełnieniu warunku szybkiej reakcji na zmiany warunków pracy silnika. Wysokie ciśnienie wtrysku, możliwe do uzyskania przy małej prędkości obrotowej, umożliwia zwiększenie momentu obrotowego silnika o 20 do 30%. Wyeliminowanie mechanicznych i hydraulicznych ograniczeń układu konwencjonalnego pozwala natomiast na zwiększenie dopuszczalnej prędkości obrotowej. Zastosowanie systemu typu CR prowadzi w efekcie do obniżenia zużycia paliwa i emisji toksycznych związków zawartych w spalinach oraz wzrostu wysilenia jednostki napędowej.

System typu CR z pompą wysokiego ciśnienia pozwala uzyskać określone wartości ciśnień w całym polu charakterystyki pracy silnika. Pompa wysokiego ciśnienia pracuje w trybie sterowania objętościowego, czyli dla każdego kolejnego wtrysku jest dobierana dawka i określone ciśnienie wtrysku. Daje to też nowe możliwości w sterowaniu dawkowaniem paliwa. Użycie procesora do sterowania układem umożliwia bowiem precyzyjne dzielenie dawki wtryskiwanego paliwa (dawka pilotująca, główna i powtrysk). O ile dawka pilotująca przyczynia się głównie do obniżenia hałasu silnika (skrócony okres opóźnienia samozapłonu), to powtrysk umożliwia obniżenie emisji tlenków azotu przy zastosowaniu reaktorów katalitycznych DeNOx. Przewiduje się też technologie oparte na technice plazmowej oraz bazujące na modyfikatorach, dodawanych do paliwa, gdzie jego poszczególne funkcje spełniałyby rolę czynnika redukującego [1].

Wtryskiwacze paliwa są najbardziej wrażliwym na uszkodzenia elementem układu wtrysku paliwa. Ważnym zatem zagadnieniem jest prawidłowa ocena stanu ich zużycia. Analiza danych eksploatacji pojazdów pozwala zauważyć, że w 70 – 80% przypadków przyczyną niewłaściwego funkcjonowania silników o zapłonie samoczynnym są niesprawne wtryskiwacze. Do oceny poprawności funkcjonowania układu zasilania tych silników są wykorzystywane informacje uzyskane podczas obserwacji pracy silnika oraz wyniki pomiarów poszczególnych parametrów.

Podczas ogólnych badań stanu technicznego silnika wykonywane są sprawdzenia, celem oceny poprawności funkcjonowania silnika. Zaliczamy do nich:

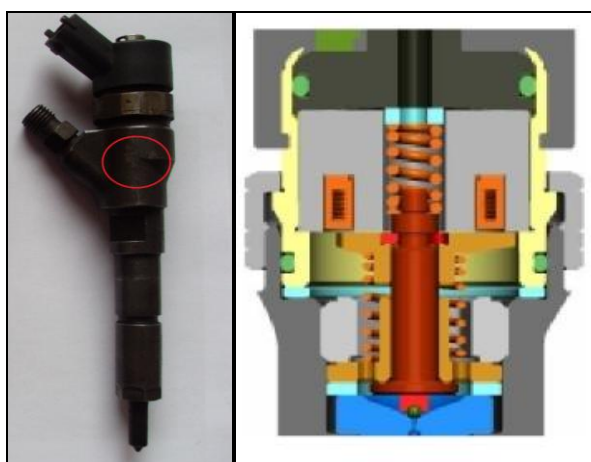
- kontrolę łatwości uruchomienia silnika,
- pomiar mocy silnika,
- kontrolę równomierności pracy silnika,
- ocenę hałaśliwości pracy silnika,
- ocenę zadymienia spalin.

Wszystkie powyższe symptomy mogą być spowodowane szeregiem nakładających się czynników, na które jednak składa się jeden podstawowy – niewłaściwa praca wtryskiwaczy. Warunkiem koniecznym utrzymania urządzenia w stanie sprawności jest ciągłe diagnozowanie i prognozowanie jego stanu. W związku z tym zaproponowano metodę polegającą na wykorzystaniu obrazu z kame-

ry termowizyjnej do oceny stanu technicznego wtryskiwaczy stosowanych w układach wtryskowych typu common rail. Ta nieinwazyjna, stosunkowo łatwa w zastosowaniu metoda z powodzeniem może być wykorzystywana do wstępnej diagnostyki wtryskiwaczy paliwa odnosząc się zarówno do oceny ich stanu technicznego, jak również wstępnego doboru wtryskiwaczy [2].

## 1. CEL BADAŃ

Podstawowym celem niniejszej pracy badawczej była analiza stanu technicznego wtryskiwacza elektromagnetycznego, za pomocą kamery termowizyjnej. Na podstawie zmierzonej w określonym punkcie (rysunek 1) wartości parametru – temperatury korpusu wtryskiwacza, dokonano analizy zmiany gradientu temperatury w zależności od czasu trwania jego pracy. W dokonanej analizie określono różnice wartości temperatur korpusu wtryskiwacza z uszkodzonym zespołem zaworu sterującego oraz wtryskiwacza w pełni sprawnego.



Rys. 1. Miejsce na wtryskiwaczu, w którym znajduje się zawór sterujący (czerwona obwódka) oraz budowa zaworu sterującego [3]

Drugim praktycznym celem, było opracowanie metody diagnozowania usterek wtryskiwaczy elektromagnetycznych bez ich częściowego demontażu. Obecna technologia napraw przewiduje następującą procedurę [3]:

- Sprawdzenie wtryskiwacza na stole probierczym

- Demontaż wtryskiwacza
- Mycie części
- Wzrokowa weryfikacja części
- Wymiana części uszkodzonych (ew. regeneracja)
- Ponowny montaż
- Sprawdzenie na stole probierczym.

Doświadczony diagnosta dokonując oceny poprawności pracy silnika może zakładać ewentualne przyczyny występowania usterek. Nie zawsze jednak może w sposób dokładny stwierdzić źródło ich pochodzenia. Praktyka warsztatowa jasno wskazuje, że wymiana elementów na nowe nie zawsze przynosi pozytywne skutki, co potwierdza jedno z założeń autorów – w wielu przypadkach naprawa oparta jest na metodzie prób i błędów.

## 2. OBIEKTY BADAŃ I STANOWISKO BADAWCZE

Objektami badań były wtryskiwacze I generacji produkcji Bosch (rysunek 2). Przed przystąpieniem do badań skategoryzowano rodzaje uszkodzeń elementów wykonawczych i par precyzyjnych, do których dochodzi w ww. wtryskiwaczach (tab. 1). Ze względu na powszechność występowania uszkodzeń mechanicznych powierzchni gniazda kulki zaworu sterującego postanowiono dokonać kontrolowanych uszkodzeń tego elementu. Przykładowa fotografia ukazująca uszkodzenie gniazda kulki została przedstawiona na rysunku 3.



Rys. 2. Obiekty badań: wtryskiwacz 1 – 3 – wtryskiwacz uszkodzony, wtryskiwacz 4 – wtryskiwacz sprawny

Tab. 1. Zestawienie możliwych uszkodzeń elementów wykonawczych i par precyzyjnych wtryskiwaczy

Rodzaj części	Rodzaj usterek	Możliwe przyczyny
Zawór sterujący	Uszkodzenie gniazda	Zawyżona dawka przelewu; źle dobrany skok kulki; zła jakość i zanieczyszczenie paliwa; niewłaściwa filtracja; obecność ciał stałych (wadliwa pompa); procesy
	Zarysowanie powierzchni trzpienia	Zła jakość (smarność) i zanieczyszczenie paliwa; niewłaściwa filtracja; obecność ciał stałych (wadliwa pompa)
	Pęknięcie pierścienia wysokociśnieniowego	Długotrwała eksploatacja silnika
Rozpylacz	Deformacja studzienki bądź gniazda	Zła jakość i zanieczyszczenie paliwa; niewłaściwa filtracja; obecność ciał stałych (wadliwa pompa)
	Zarysowanie powierzchni	j:w
	Zatarcie powierzchni prowadzącej	j:w
	Skorodowanie powierzchni prowadzącej	Zła jakość paliwa (zawartość siarki, wody)
	Przegrzanie stref kontaktu	Długotrwała i intensywna eksploatacja silnika; zbyt wysoka temperatura pracy
Iglia	Uszkodzenie stożka	Zła jakość i zanieczyszczenie paliwa; niewłaściwa filtracja; obecność ciał stałych (wadliwa pompa)
	Zarysowanie powierzchni	j:w
	Zatarcie	j:w
	Skorodowanie powierzchni prowadzącej	Zła jakość paliwa (zawartość siarki, wody)
	Przegrzanie stref kontaktu	Długotrwała i intensywna eksploatacja silnika; zbyt wysoka temperatura pracy

Efektom takiego zabiegu był znaczny (niekontrolowany) wzrost dawki paliwa, który powodował wadliwe działanie wtryskiwaczy. Badania przeprowadzono na stanowisku składającym się z modułu elektronicznego sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym typu common rail, który został zaprojektowany i wykonany przez firmę Mechatronika Wyposażenie Dydaktyczne Sp. z o.o.

W jego skład wchodzi dwa podstawowe moduły:  
– zespół sterowania pompą i wtryskiwaczami systemu common rail, służący do demonstrowania

działania oraz badania parametrów elektrycznych i hydraulicznych systemu sterowania pompy wysokiego ciśnienia i wtryskiwaczy elektromagnetycznych,

- zespół sterowania silnikiem o ZS typu common rail, wyposażony w mikroprocesorowy sterownik, służący do demonstrowania układu sterowania pompą wysokiego ciśnienia i wtryskiwaczami



**Rys. 3.** Uszkodzenie gniazda zaworu sterującego [3]

oraz pomiaru jego parametrów. W stanowisku użytym do badań możliwa jest prezentacja działania podzespołów oraz zmiana dawki paliwa. Pulpit pomiarowy pozwala łatwe podłączenie przyrządów pomiarowych do wszystkich czujników i podzespołów wykonawczych systemu, a sterowanie napędem pompy umożliwia symulowanie pełnego zakresu prędkości obrotowych od fazy rozruchu do pełnych obrotów.

Opisywane stanowisko, którego widok zaprezentowano na rysunku 4, zostało dostosowane do założonych badań. Zdjęcia prze-

prowadzonych pomiarów wykonano za pomocą kamery termowizyjnej FLIR T365 będącej na wyposażeniu Laboratorium Silników Spalinowych Politechniki Poznańskiej.

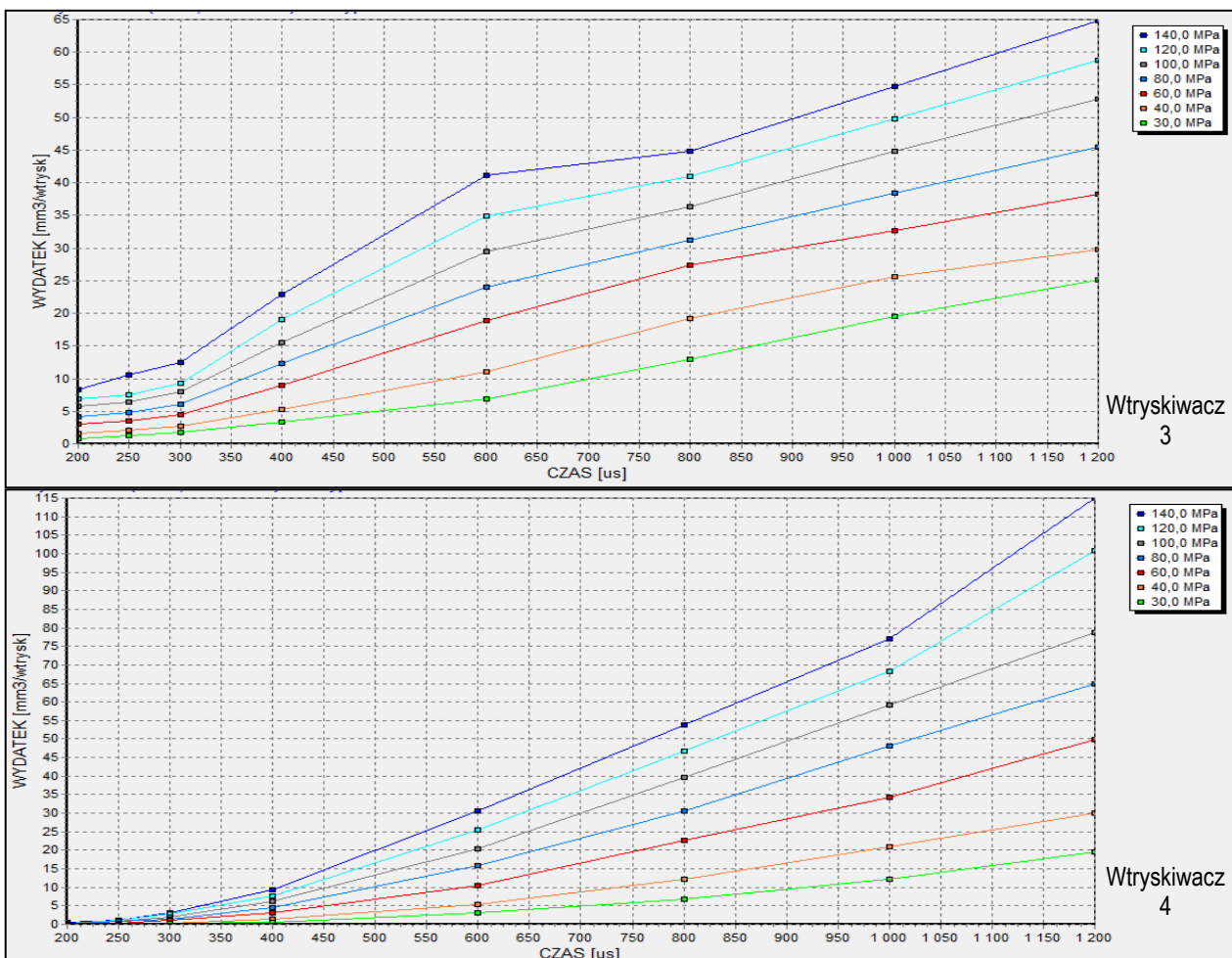
Pomiar każdego wtryskiwacza trwał 15 minut, a rejestracja zmian temperatur była wykonywana co 15 sekund. Za początek pomiaru został uznany moment włączenia wtryskiwaczy w tryb pracy za pomocą modułu sterującego EDC – common rail (rysunek 5).



**Rys. 4.** Stanowisko badawcze z zamontowanym wtryskiwaczem



**Rys. 5.** Parametry pracy wtryskiwaczy



**Rys. 6.** Charakterystyki wybranych wtryskiwaczy wykonane na stole probierczym Wtryskiwacz 3 – uszkodzony; Wtryskiwacz 4 – sprawny

Parametry pracy ustawiono jednakowo dla każdego wtryskiwacza:

- a) ciśnienie paliwa: ok. 100 MPa
- b) czas trwania wtrysku: 2 ms
- c) obroty pompy wysokiego ciśnienia: 1 300 obr/min

Wynika to z faktu niesprawnego działania zaworu sterującego, którym paliwo trafia bezpośrednio na przelew. Sytuacja ta ma miejsce przy ciśnieniu równym 130 MPa oraz dla czasu wtrysku wynoszącego 1 300  $\mu$ s. Dla ciśnienia 25 MPa oraz czasu wtrysku równego 600  $\mu$ s różnica w dawce jest bardziej widoczna. Dawkę paliwa mniejszą od dawki przy sprawnym wtryskiwaczu o ponad 22% można tłumaczyć tym, że przy mniejszym ciśnieniu znacznie trudniej pokonać opory sprężyny zaworu. Wtryskiwacz trzeci charakteryzuje zbyt mała dawka paliwa (o ponad 12%), a także zdecydowanie zbyt duża ilość paliwa, która trafia bezpośrednio na przelew – aż 240 [mm<sup>3</sup>/1wtr], co stanowi 275%. Wtryskiwacz czwarty mieści się w dozwolonych zakresach wydatku i przelewu.

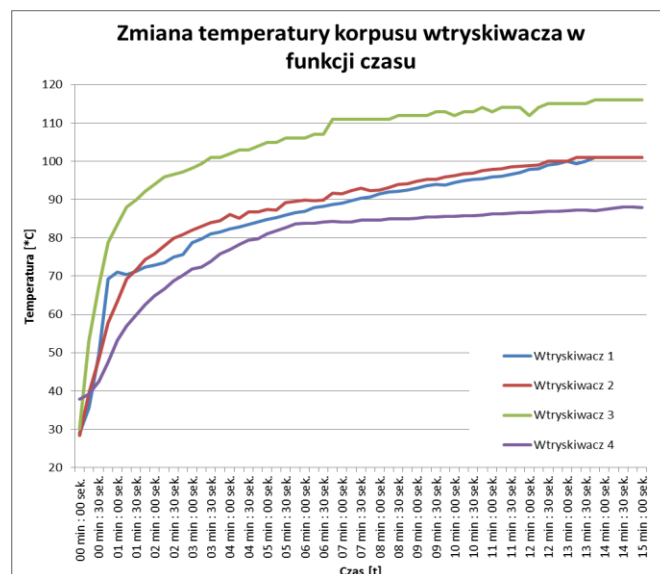
Znając charakterystyki wtryskiwaczy oraz posiadając informacje o tym, w których wtryskiwaczach uszkodzone zostały gniazda kulki zaworu sterującego można zweryfikować słusność wykorzystywania metod termowizyjnych do diagnozowania stanu technicznego wtryskiwaczy bez ich demontażu.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Badane wtryskiwacze zostały poddane takim samym obciążeniom, przy jednakowych warunkach fizykochemicznych. Łączna liczba wykonanych zdjęć uniemożliwia ich zaprezentowanie w całości w niniejszej pracy, dlatego zostaną wyszczególnione niektóre z nich.

Zaprezentowane na rysunku 7 serie danych przedstawiające wyniki pomiarów temperatury korpusu badanych wtryskiwaczy w miejscu występowania gniazda zaworu sterującego pozwalają zauważyć różnice w szybkości nagrzewania się testowanych wtryskiwaczy. W przypadku wtryskiwacza numer 1 zauważyć można, że w ciągu pierwszej minuty pomiarów nagrzewa się on do temperatury około 70 °C. W tym samym czasie temperatura korpusu wtryskiwacza numer 2 wynosiła około 65 °C. Najwyższą zmianą temperatury w tym okresie czasu charakteryzował się wtryskiwacz numer 3. W ciągu pierwszej minuty pomiarów korpus w miejscu występowania gniazda zaworu sterującego nagrzął się do temperatury około 80 °C. Jedyny sprawny wtryskiwacz (nr 4) w ciągu pierwszej minuty badań osiągnął temperaturę zaledwie zbliżoną 50 °C. Zauważyć należy, że ostatni wtryskiwacz posiadał również najwyższą temperaturę w momencie rozpoczęcia badań, co podkreśla dodatkowo fakt, że

jego nagrzewanie było najwolniejsze. Podobne zależności można zauważyć dla połowy czasu trwania testu. W ciągu kolejnych sześciu minut i trzydziestu sekund pomiarów temperatura pierwszego wtryskiwacza wzrosła o około 20 °C.



Rys. 7. Zmiana temperatury korpusu badanych wtryskiwaczy w funkcji czasu pracy

Dla drugiego wtryskiwacza w tym samym czasie nastąpił wzrost temperatury o 30 °C, aby w połowie pomiarów osiągnąć około 95 °C.

Korpus wtryskiwacza numer 3 w miejscu występowania zaworu sterującego po siedmiu i pół minuty pracy rozgrzał się do temperatury ponad 110 °C co stanowi wzrost o 30 °C względem temperatury jaką osiągnął w pierwszej minucie pracy. Ostatni wtryskiwacz w określonym punkcie czasowym osiągnął temperaturę 85 °C co oznacza wzrost temperatury o około 35 °C.

Kolejnym punktem czasowym, w którym dokonano analizy temperatury korpusu jest moment zakończenia testu. W przedziale czasu równym 15 minut wtryskiwacz numer 1 osiągnął temperaturę nieco powyżej 100 °C. Identyczną temperaturę osiągnął również korpus wtryskiwacza numer 2. Temperatura wtryskiwacza numer 3 pod koniec badań wynosiła 116 °C i była większa o 6 °C względem połowy czasu pomiaru. Ostatni wtryskiwacz pod koniec badań charakteryzował się temperaturą korpusu w miejscu występowania zaworu sterującego na poziomie 86 °C.

Tab. 2. Charakterystyki badanych wtryskiwaczy

	Ciśnienie wtrysku	Czas wtrysku	Dopuszczalny zakres wydatku jednego wtrysku		Wtryskiwacz nr 1	Wtryskiwacz nr 2	Wtryskiwacz nr 3	Wtryskiwacz nr 4
Nr	[Mpa]	[ $\mu$ s]	[mm <sup>3</sup> /1wtr]	Nr kat.	445110146	445110146	445110146	445110146
1	130	1300	68,36-75,64	Dawka	73	68	60	71
			16-64	Przelew	88	68	240	24
2	25	600	2,52-5,48	Dawka	3,00	1,96	5,40	3,50
			-	Przelew	18,00	9,00	54	6,75
3	80	160	0,61-3,19	Dawka	2,25	0,62	4,75	2,75
			-	Przelew	24,00	5,09	120	7,50



**Rys. 8.** Zmiana temperatury korpusu wtryskiwacza 4 - sprawný



**Rys. 9.** Zmiana temperatury korpusu wtryskiwacza 3 - niesprawný

**PODSUMOWANIE**

Idea oceny stanu technicznego wtryskiwaczy elektromagnetycznych za pomocą metod termowizyjnych zrodziła się ma swoje podstawy w doświadczeniu i wiedzy warsztatowej. Doświadczony mechanik jest w stanie wstępnie ocenić stan techniczny wtryskiwacza na podstawie temperatury jego korpusu. Przeprowadzone badania udowodniły, że istnieje zależność między szybkością wzrostu temperatury korpusu uszkodzonych wtryskiwaczy oraz ich temperaturą maksymalnym, a wydatkiem dawki wtrysku i wydatkiem na przelewie. Prawidłowość ta widoczna jest w wynikach badań zaprezentowanych w niniejszej pracy, gdzie najwyższa temperatura i najkrótszy czas nagrzewania zaobserwowane zostały dla uszkodzonego wtryskiwacza numer 3, który charakteryzował się największymi odstępstwami od normy w dawce wtrysku i dawce przelewu. Najniższa temperatura, jak i również najdłuższy czas nagrzewania zaobserwowane zostały w przypadku wtryskiwacza numer 4, którego wartości dawki wtrysku i dawki przelewu mieściły się w dopuszczalnym przez producenta zakresie. Pozwala to wnioskować, że w wyniku uszkodzenia gniazda zaworu sterującego dochodzi do wydzielania się większej ilości ciepła, co może być zaobserwowane przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej, potwierdzając tym samym słuszność zaproponowanej metody.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Energy balance and CO<sub>2</sub> Balance. Danish Center For Plant Oil Technology, Hurup, Danmark, 2000
2. Idzior M., "Problemy doboru wtryskiwaczy silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami alternatywnymi", WNITE, Poznań 2012
3. CSM Kędzia – materiały szkoleniowe.

Publikacja powstała w ramach realizacji projektu "Nowa generacja pomp wtryskowych typu common rail" w programie Lider V (Lider/015/273/L-5/13/NCBR/2014), współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

**THE POSSIBILITY OF USING THERMAL IMAGING METHODS TO EVALUATE TECHNICAL CONDITION OF DIESEL ENGINE'S INJECTORS**

**Abstract**

The paper presents a method based on the use of the image from the infrared camera to assess the technical condition of the injectors used in CR injection systems. The study involved four injectors, whose condition was known. Three of them were characterized by frequently encountered fault - have damaged the control valve seat, one of the injectors was fully operational. In order to precisely evaluate the technical condition of the injectors were tested on the test stand. In main studies a specially constructed test bench have been used. During operation of the injectors at a constant interval of time, the temperature of the body at the location of the control valve have been measured.

**Autorzy:**

- prof. dr hab. inż. **Marek Idzior** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu
- dr. inż. **Wojciech Karpiuk** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu
- mgr. inż. **Rafał Smolec** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu,
- mgr. inż. **Bartosz Henszke** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu,