

WSTĘPNA DIAGNOSTYKA POJAZDU Z WYKORZYSTANIEM KAMERY TERMOWIZYJNEJ

W artykule wskazano na możliwość przeprowadzenia wstępnej diagnostyki pojazdu za pomocą kamery termowizyjnej. Opisano wymagania odnośnie skalowania kamery i warunków przeprowadzenia badania. Opisano błędy popełniane podczas pomiarów i interpretacji obrazów termicznych. Zaprezentowano wyniki badań układu chłodzącego samochodu. Na podstawie wykonanych zdjęć oraz zarejestrowanych wielkości przedziałów czasowych nagrzewania się układu chłodzącego i głowicy silnika sformułowano wnioski dotyczące prawidłowości ich działania

WSTĘP

Badanie termowizyjne jest uniwersalną techniką pomiarową, umożliwiającą obserwację i rejestrację promieniowania podczerwonego emitowanego przez przedmioty znajdujące się w otaczającym nas środowisku. Zarejestrowane i przetworzone przez urządzenia termograficzne wartości emitowanego promieniowania podczerwonego, pozwalają na stworzenie obrazu, czarno – białego lub barwnego, będącego odzwierciedleniem rozkładu temperatury badanego obiektu. Termowizja polega na zdalnej i bezdotykowej ocenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała. Metoda ta poparta jest na obserwacji i zapisie promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania na światło widzialne. Obecnie, najczęściej określonemu zakresowi wartości temperatury przyporządkowuje się odpowiedni kolor, co po przetworzeniu i wizualizacji tworzy barwny obraz pola temperatury badanego obiektu. Przy uwzględnieniu jego cech fizycznych, w tym emisyjności, wpływu czynników z otoczenia, oraz właściwości samego obiektu detekcji i przetwarzania promieniowania podczerwonego, można uzyskać precyzyjne dane dotyczące temperatury w poszczególnych obszarach powierzchni obiektu. Poprzez termowizyjny pomiar temperatury można określić rozkład temperatury na całej powierzchni badanego obiektu oraz przy ciągłej lub okresowej rejestracji obrazów termalnych, jej zmienność w czasie.

1. KAMERY TERMOWIZYJNE

Standardowa kamera składa się z następujących elementów: detektor podczerwieni, obiektyw dla wybranego zakresu podczerwieni, zespół elektroniczny toru wzmocnienia i odczytu sygnału z detektora, elektroniczne zespoły rejestracji i analizy sygnału oraz zespół wizualizacji. Detektory są najbardziej zaawansowanym technologicznie elementami kamer. Kamery termowizyjne mogą być wyposażone w detektor pojedynczy, liniijkę detektorów lub matrycę detektorów.

1.1. Detektor podczerwieni

Detektor podczerwieni jest to: detektor promieniowania podczerwonego, przetwornik promieniowania podczerwonego. Przy niezbyt dużych mocach promieniowania otrzymywany w detektorze sygnał elektryczny jest proporcjonalny do mocy padającego promieniowania. Innymi parametrami charakteryzującymi większość detektorów

są: czułość (stosunek wielkości sygnału elektrycznego do mocy promieniowania), wykrywalność (wielkość określająca możliwość wykrywania słabych źródeł promieniowania) oraz szybkość reakcji na promieniowanie.

Detektor podczerwieni często jest określany jako wykrywacz promieniowania podczerwonego. Najważniejsze znaczenie mają tu detektory: cieplny, którego działanie oparte jest na wykorzystaniu zmian rezystancji lub napięcia w wyniku cieplnego oddziaływania promieniowania oraz fotoelektryczny, działający w wyniku zmiany energii promienistej na energię cieplną [6].

Detektory promieniowania elektromagnetycznego z zakresu podczerwieni można podzielić na dwie podstawowe grupy: fotonowe oraz termiczne. W fotonowych padające promieniowanie jest absorbowane na wskutek oddziaływania fotonów z elektronami. Sygnał detektora jest wywołany zmianą rozkładu energii nośników. Detektory fotonowe wykazują selektywną zależność czułości od długości fali padającego promieniowania i w porównaniu z detektorami termicznymi charakteryzują się wyższą wykrywalnością i większą szybkością odpowiedzi. Detektory o długofalowej granicy czułości powyżej 3 μm są zwykle chłodzone do temperatury poniżej 300 K w celu zmniejszenia termicznych procesów wzbudzenia nośników.

Detektory termiczne dzielą się na piroelektryczne i bolometry. Padające promieniowanie jest w nich absorbowane w materiale, co powoduje podniesienie temperatury elementu fotoczułego. Sygnał wyjściowy detektora jest wywołany zmianą pewnej właściwości materiału zależnej od temperatury. W przypadku detektorów piroelektrycznych jest to zmiana wewnętrznej polaryzacji elektrycznej a w bolometrach - zmiana rezystancji. Generalnie czułość widma detektorów termicznych jest niezależna od długości fali i w większości przypadków działają one w temperaturze pokojowej. Szybkość detektorów termicznych jest mała, wynosi od 10^{-3} do 10^{-1} s [4].

1.2. Parametry metrologiczne detektorów podczerwieni

Parametry metrologiczne detektorów podczerwieni [2]

- Czułość napięciowa lub prądowa (widmowa) jest definiowana jako stosunek wartości skutecznej pierwszej harmonicznej napięcia (prądu) wyjściowego detektora do wartości skutecznej pierwszej harmonicznej mocy padającego promieniowania. W przypadku detektorów podczerwieni podaje się zależność widmową lub czułość detektora na promieniowanie ciała czarnego o określonej temperaturze, najczęściej 500K.

- Czułość temperaturowa – parametr ten umożliwia wyznaczenie wartości sygnału w wyniku jednostkowej zmiany temperatury dla temperatury obiektu $T_{ob} = T_o$.
- Szybkość odpowiedzi – określana min. Stałą czasową detektora. Ogólnie można powiedzieć, że detektory termiczne posiadają stałe czasowe od pojedynczych sekund (piroelektryczne, pneumatyczne) do milisekund. Częstotliwości graniczne najszybszych detektorów termicznych wynoszą do kilkuset Hz. Detektory fotonowe są szybkie, ich częstotliwości graniczne dochodzą do kilkuset MHz. Wartość stałej czasowej powinna być jak najmniejsza, aby można było rejestrować termogramy szybkich, czasem ultraszybkich procesów cieplnych.
- moc równoważna szumowi (NEP) – jest to taka wartość skuteczna mocy promieniowania monochromatycznego o długości fali λ padającego na detektor, który daje na wyjściu sygnał napięciowy o wartości skutecznej równej poziomowi szumu, znormalizowanego do jednostki szerokości pasma. Jest to moc natężenia promieniowania wymagana do uzyskania na wyjściu detektora stosunku sygnału do szumu równego jedności. NEP jest wyrażona w watach. Ponieważ wartość skuteczna napięcia szumów jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z szerokości pasma, więc NEP jest także wyrażana dla określonej szerokości pasma, najczęściej dla 1 Hz.
- Znormalizowana wykrywalność widmowa D (detekcyjność, próg czułości unormowany) – jest definiowana jako odwrotność NEP. Jest ona najczęściej stosowanym parametrem do oceny porównawczej właściwości metrologicznych detektorów. Wskaźnik D jest jednostką odniesioną do jednostki powierzchni detektora oraz jednostkowej szerokości pasma. Wykrywalność znormalizowana określa jaki jest stosunek sygnału do szumu, znormalizowanego względem pasma wykorzystywanych częstotliwości i powierzchni czynnej detektora, przy padającym strumieniu promieniowania cieplnego o mocy jednostkowej. Im większa jest ta wartość oraz szersze jest pasmo wykorzystywanych częstotliwości, tym detektor jest bardziej precyzyjny i czuły.

2. PIROMETRY

Pirometr mierzy natężenie promieniowania podczerwonego dochodzącego od przedmiotu do jego obiektywu. Jednym z parametrów charakteryzującym pirometry jest rozdzielczość optyczna będąca stosunkiem odległości od obiektu do średnicy pola dla którego wykonywany jest pomiar. Kolejnym parametrem jest emisyjność badanego materiału, określająca zdolność do oddawania promieniowania podczerwonego, przyjmuje wartość od 0 do 1. Emisyjność większości substancji organicznych jest zbliżona do 0,95.

Do bezdotykowego pomiaru temperatury metali, których emisyjność może być zdecydowanie mniejsza, zaleca się stosowanie pirometrów z regulowanym współczynnikiem emisyjności.

Do pomiaru temperatur powyżej 600°C używane są pirometry optyczne, w których jasność świecenia badanego obiektu jest porównywalna z jasnością obiektu wzorcowego (żarnika). W pirometrach najwyższej klasy mierzących w zakresie niskich wartości temperatury stosuje się optykę zwierciadlaną, analogiczną do stosowanej w aparatach fotograficznych tzw. lustrzankach. W pirometrach stosuje się dwie grupy detektorów: termiczne i fotoelektryczne.

3. ŹRÓDŁA BŁĘDÓW W POMIARACH TERMOGRAFICZNYCH

Należy dążyć do tego aby osiągnięte wyniki były rzetelne i posłużyły do obiektywnej oceny badanego przedmiotu. Producenci kamer zwracają uwagę na optymalne warunki pracy i uwrażliwiają na czynniki, które mogą zakłócić wyniki pomiaru.

Najczęściej spotykane błędy:

1. Nieprawidłowe ustawienie emisyjności
Każdy przedmiot posiada swoją indywidualną emisyjność, jest to zdolność materiału do emitowania (oddawania) promieniowania podczerwonego. Parametr ten zależy od właściwości podłoża, materiału oraz w przypadku niektórych materiałów, od temperatury mierzonego przedmiotu. Materiały niemetaliczne mają wysoką emisyjność w zakresie długich fal promieniowania podczerwonego, która nie zależy od temperatury. Z kolei metale, mają niską emisyjność zmniejszającą się wraz z temperaturą. Im większa różnica między temperaturą mierzonego przedmiotu a temperaturą otoczenia i im niższa emisyjność, tym większe błędy pomiaru. Błędy te są większe w przypadku nieprawidłowego ustawienia emisyjności. W celu określenia emisyjności powierzchni badanego przedmiotu można odnieść się do tabel emisyjności. Innym sposobem na określenie emisyjności jest dokonanie pomiaru referencyjnego za pomocą termometru kontaktowego. Należy zmierzyć termometrem temperaturę badanego przedmiotu a następnie zmierzyć temperaturę za pomocą kamery termowizyjnej przy ustawieniu emisyjności na wartość równą 1. Różnica między zmierzonymi wartościami temperatur to wynik zbyt wysokiego ustawienia emisyjności. Stopniowo obniżając emisyjność można zmienić wynik pomiaru temperatury aż do momentu, gdy będzie odpowiadać wartości otrzymanej podczas pomiaru kontaktowego [2, 5].
Emisyjność można również określić wykorzystując tylko kamerę termowizyjną. W tym celu należy użyć także taśmy z określoną emisyjnością (dostępna u dystrybutorów kamer termowizyjnych) lub alternatywnie farba o znanej emisyjności. Aby dokonać pomiaru należy umieścić kawałek taśmy na mierzonym przedmiocie następnie dokonać pomiaru temperatury powierzchni mierzonego przedmiotu na zaklejonym obszarze za pomocą kamery termowizyjnej przy emisyjności ustawionej dla taśmy. Zmierzona temperatura będzie temperaturą referencyjną. Tak ustawiona emisyjność odpowiada emisyjności powierzchni badanego przedmiotu.
2. Nieprawidłowe ustawienie RTC
Zmienną tę można ręcznie ustawić w kamerze. Parametr ten czyli kompensacja temperatury odbitej może zostać określony przy użyciu radiatora Lamberta. Należy pamiętać jednak, że po usunięciu wszystkich możliwych źródeł zakłóceń, które mogłyby wpływać na pomiar, temperatura odbitego promieniowania jest taka sama jak temperatura otoczenia, można ją zmierzyć za pomocą termometru. Na tej podstawie RTC może być wprowadzone do kamery termowizyjnej. Jeżeli jednak źródła promieniowania są obecne w środowisku pomiarowym, należy określić temperaturę odbitego promieniowania celu zapewnienia dokładnego wyniku pomiaru. Pomiaru temperatury odbitej dokonuje się za pomocą radiatora Lamberta. Radiator Lamberta to przedmiot, który odbija incydentalne promieniowanie przy optymalnym rozproszeniu, czyli równo we wszystkich kierunkach. Temperatura promieniowania odbitego może być zmierzona na radiatorze Lamberta przy pomocy kamery termowizyjnej. Odpowiednim zamiennikiem tego urządzenia może być kawałek zgniecionej a następnie rozwiniętej folii aluminiowej. Folia posiada wysoki współ-

czynnik odbicia a dzięki pomarszczonej strukturze, odbicie rozproszone promieniowania jest bliskie idealowi. W celu zmierzenia temperatury promieniowania odbitego należy umieścić radiator Lamberta niedaleko badanego przedmiotu lub na jego powierzchni. Następnie należy zmierzyć temperaturę radiatora przy emisyjności ustawionej na wartość jeden. Kamera dokona obliczenia temperatury promieniowania incydentalnego. Teraz można wprowadzić tę wartość jako RTC do kamery termowizyjnej i dokonać właściwego pomiaru temperatury mierzonego przedmiotu przy emisyjności ustawionej dla powierzchni badanego przedmiotu. [3].

3. Odległość pomiarowa niedostosowana do wielkości obiektu
W celu określenia prawidłowej odległości do prowadzenia pomiaru oraz maksymalnej wielkości przedmiotu, który będzie widzialny lub mierzalny muszą być wzięte pod uwagę trzy zmienne [3]:

- pole widzenia FOV,
- najmniejszy identyfikowany przedmiot IFOVgeo,
- najmniejszy mierzalny przedmiot (punkt) pomiarowy IFOVmeas.

Pole widzenia FOV kamery termowizyjnej określa obszar widoczny za pomocą kamery termowizyjnej. Determinuje je użyty obiektyw szerokokątny 32° lub teleobiektyw 9°. Ponadto należy poznać dane najmniejszego identyfikowalnego przedmiotu IFOVgeo dla danej kamery termowizyjnej. Określa to rozmiar piksela według odległości. Dla przykładu przy rozdzielczości przestrzennej obiektywu wynoszącej 3,5 mrad oraz odległości pomiarowej równej 1 m, najmniejszy identyfikowalny przedmiot IFOVgeo ma długość krawędzi równa 3,5mm i jest pokazywany na wyświetlaczu jako jeden piksel. W celu otrzymania dokładnych wyników pomiaru mierzony obiekt powinien być 2 – 3 razy większy niż najmniejszy identyfikowalny przedmiot IFOVgeo.

4. Wpływ środowiska zewnętrznego

Należą do nich źródła zewnętrznego promieniowania (żarówki, grzejniki) jak również czynniki atmosferyczne. Idealne warunki pomiaru panują w chłodne zachmurzone dni. Powłoka chmur zasłania przedmioty przed promieniowaniem słonecznym i „zimnym rozproszonym promieniowaniem niebieskim”. Z kolei w czasie deszczu lub opadów śniegu wynik pomiarów może być zakłócony, woda, lód i śnieg mają wysoką emisyjność i są nieprzepuszczalne dla promieniowania podczerwonego. Ponadto pomiar mokrych przedmiotów może zawierać błędy, ponieważ ich powierzchnia chłodzi się podczas wyparowywania cieczy. Wiatr lub przeciąg w pomieszczeniu może mieć również wpływ na pomiar temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Na wskutek wymiany ciepła (konwekcji), powietrze znajdujące się blisko powierzchni ma taką samą temperaturę jak badany przedmiot. Przy dużym przepływie powietrza, ta przypowierzchniowa warstwa powietrza jest „zdmuchiwana” i zastępowana nową warstwą, która nie dopasowała się jeszcze do temperatury badanego przedmiotu.

4. BADANIA NA OBIEKCIE RZECZYWISTYM

Celem badań było określenie zmian temperatury wybranych elementów silnika spalinowego oraz układu chłodzenia w celu pośredniego określenia ich stanu technicznego. Badania przeprowadzono od chwili rozruchu do chwili osiągnięcia stanu równowagi cieplnej. Celem dodatkowym było sprawdzenie przydatności kamery termowizyjnej Easir-4 do tego typu badań.

Dokonano pomiarów temperatury następujące elementy silnika:

- dolnego i górnego gumowego przewodu łączącego silnik z chłodnicą, w miejscu ich mocowania z tymi zespołami,

- kolektory wylotowe,
 - głowica silnika.
- Podczas pomiarów czynnikami stałymi były:
- temperatura otoczenia zewnętrznego $T = -4^{\circ}\text{C}$,
 - odległość obiektywu od obiektu badań $l = 0,3-0,5 \text{ m}$,
 - odstęp czasowy poszczególnych pomiarów $t = 120\text{s}$.

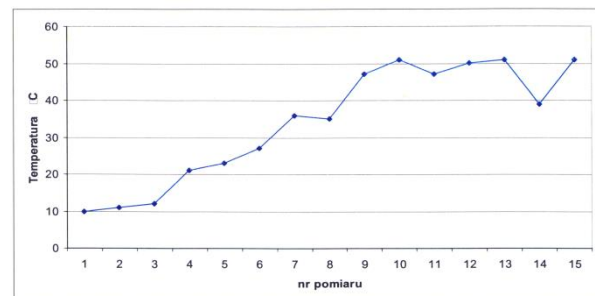
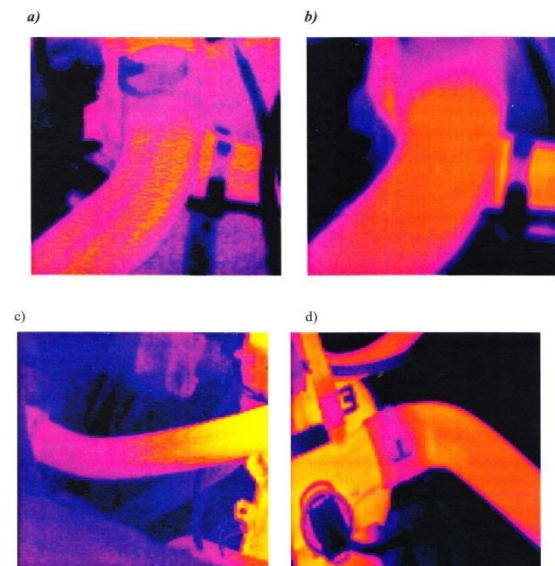
Czynnikiem zmiennym był czas działania silnika – czas upływający od momentu rozruchu. Czynniki zakłócającymi mogły być drgania podczas pracy silnika spalinowego, zróżnicowana odległość podczas pomiaru kamerą termowizyjną i pirometrem, temperatura i wilgotność powietrza oraz wpływ zewnętrznych źródeł promieniowania podczerwonego.

Badany obiekt – samochód VW Polo, rok produkcji 1992, silnik wysokoprężny 4-cylindrowy o pojemności 1,4 litra.

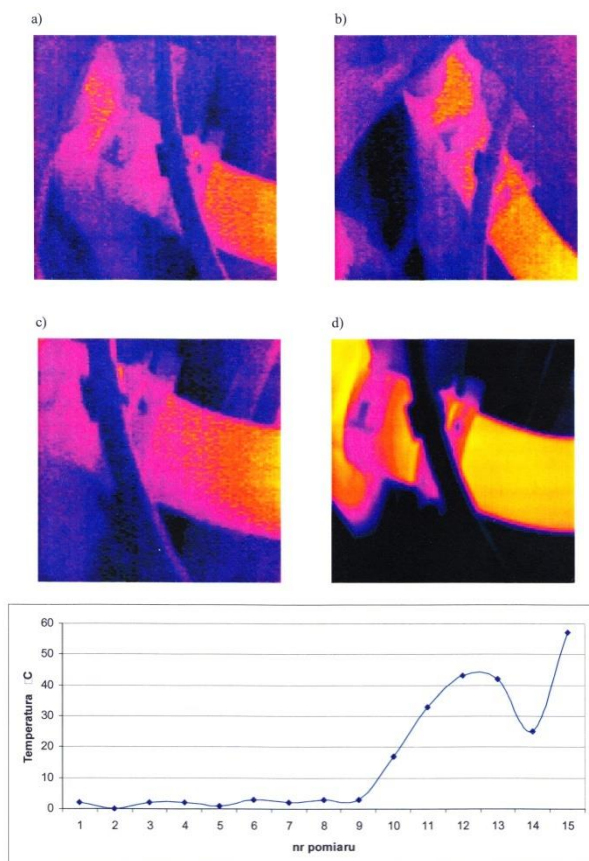
W skład stanowiska pomiarowego wchodzi: kamera termowizyjna Easir-4 oraz pirometr WGT-510 służący do bezdotykowego pomiaru temperatury.

Przebieg badań:

Badania termowizyjne przeprowadzono na terenie otwartym przy bezwietrznej pogodzie. Pomiaru przeprowadzano jednocześnie punktowo za pomocą pirometru w wybranych punktach pomiarowych oraz powierzchniowo za pomocą kamery termowizyjnej, przy zachowaniu odpowiedniego odstępu czasowego od rozruchu. Kamera termowizyjna oraz pirometr były skierowane prostopadle do badanego punktu lub powierzchni. Przy każdym pomiarze następował 120 sekundowy odstęp czasu. Podczas badań zarejestrowano temperaturę w wybranych punktach pomiarowych oraz obrazy termalne badanych elementów. Wyniki przedstawiono na rys. 1-3.



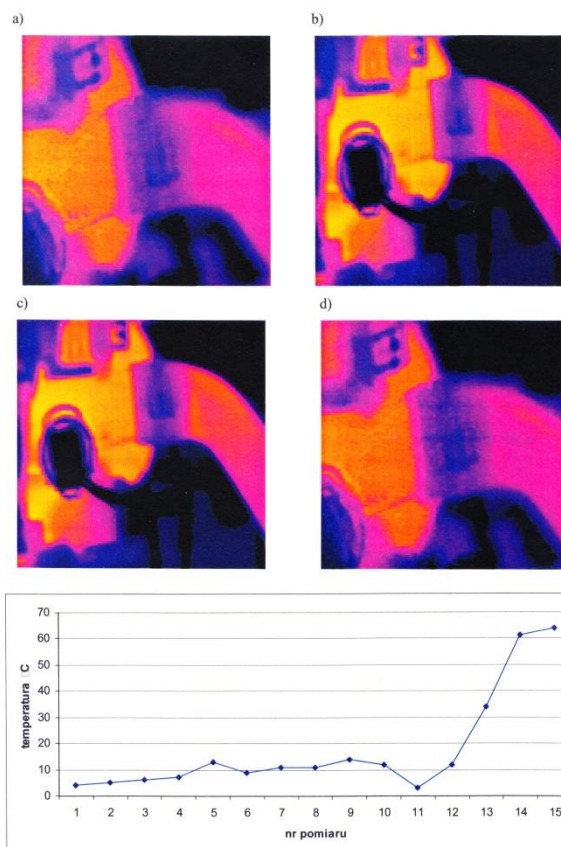
Rys. 1. Obrazy termalne górnego gumowego przewodu chłodniczego przy silniku oraz wykres zależności temperatury od czasu działania silnika: a- przed rozruchem, b- 240 s po rozruchu, c-1200 s po rozruchu, d- 3600 s po rozruchu,



Rys. 2. Obrazy termalne górnego wejścia przewodu chłodniczego na chłodnicy gumowego przewodu chłodniczego przy silniku oraz wykres zależności temperatury od czasu działania silnika: a- przed rozruchem, b- 360 s po rozruchu, c-1080 s po rozruchu, d- 2760 s po rozruchu

PODSUMOWANIE

Określono zmiany temperatury określonych elementów silnika spalinowego oraz układu chłodzenia. Pomiarzy te znajdują zastosowanie w określeniu czasu uzyskania stabilnej temperatury silnika a więc osiągnięcia optymalnych warunków pracy. Analiza zmian pola temperatury głowicy silnika, bloku silnika, kolektorów wydechowych, chłodnicy, gumowych przewodów chłodniczych, umożliwia ocenę stabilności ich pracy oraz pośrednio ocenę ich stanu technicznego. Stwierdzono, że w badanym silniku, przy temperaturze otoczenia wynoszącej -4°C , temperatura kolektora wydechowego wzrasta w tempie $5-8^{\circ}\text{C}$, przewodów gumowych $10-15^{\circ}\text{C}$, głowicy $8-9^{\circ}\text{C}$ w ciągu 10 minut. Najszybciej stabilizuje się temperatura w górnym przewodzie chłodniczym nad chłodnicą przy silniku. W czasie badania temperatura na dolnym gumowym przewodzie chłodniczym na chłodnicy nie ulega ustabilizowaniu, co może być wynikiem pracy bez obciążenia oraz niska temperatura otoczenia. W badanym silniku stwierdzono, że stabilność cieplną uzyskuje on po upływie 30 minut co świadczy o uzyskaniu w danych warunkach temperatury normalnej pracy silnika. Jednocześnie stwierdzono, że w warunkach badania temperatura pracy stabilnej jest niższa od temperatury podawanej w specyfikacji technicznej. Podczas przeprowadzonych badań zaobserwowano nierównomierny rozkład temperatury na górnym wejściu gumowego przewodu na chłodnicę co może świadczyć o nieprawidłowości w działaniu układu chłodzącego.



Rys. 3. Obrazy z kamery termowizyjnej dolnego wyjścia gumowego przewodu chłodniczego na silnik oraz wykres zależności temperatury od czasu działania silnika: a- przed rozruchem, b- 360 s po rozruchu, c-720s po rozruchu, d- 3480 s po rozruchu

BIBLIOGRAFIA

1. Fidali M.: An idea of continuous thermographic monitoring of machinery. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. Kraków 2008
2. Madura H. Pomiar termowizyjny w praktyce. Agenda Wydawnicza PAKu, Warszawa, luty 2004.
3. Monitorowanie i diagnostyka – Dodatek do „Inżynieria i utrzymanie ruchu zakładów przemysłowych”, styczeń – luty 2012
4. <http://pclab.pl>.
5. <http://www.ec-diagnostics.pl>
6. <http://www.termowizja.biz/termowizja-termografia>

Preliminary diagnostics of a vehicle with use of thermographic camera

In the article examples of applying the thermovision camera for determining the technical condition of the engine were expressed. Requirements were described in relation to calibrating the camera and conditions of conducting research. They presented research results with their interpretation

Autorzy:

Dr inż. **Aleksander Nieoczym**, dr hab. inż. **Rafał Longwic** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin; Prof. dr hab. inż. **Wincenty Lotko** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny