

OCENA ZMIAN STANU TECHNICZNEGO MASZyny NA PODSTAWIE STATYSTYCZNYCH CECH OBRAZÓW TERMOGRAFIKOWYCH

Marek FIDALI

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska w Gliwicach
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice, fax: 32 237 13 60, mfidali@polsl.pl

Streszczenie

Termografia jest jedną z bardzo dynamicznie rozwijających się dziedzin nauki, umożliwiającą bezkontaktowy pomiar temperatury. Znajduje ona coraz częściej zastosowanie w diagnostyce maszyn i urządzeń. Za pomocą kamery termowizyjnej możliwa jest obserwacja rozkładu temperatury w wielu punktach obserwowanego obiektu i jej jednoczesny bezkontaktowy pomiar oraz rejestracja w postaci obrazu termograficznego. Ogromny potencjał informacyjny, jaki posiada obraz termograficzny, stanowi źródło informacji diagnostycznych przydatnych w diagnozowaniu maszyn i urządzeń. W celu wydobycia tych informacji konieczne jest prowadzenie analizy obrazu termograficznego. W artykule przedstawiono wyniki badań termograficznych polegających na wyznaczaniu wybranych cech statystycznych serii obrazów termograficznych rejestrowanych w równoodległych chwilach czasu podczas działania maszyny wirnikowej.

Słowa kluczowe: diagnostyka termograficzna, analiza obrazów termograficznych.

EVALUATION OF MACHINERY TECHNICAL STATE ON THE BASIS OF STATISTICAL FEATURES OF THERMOGRAPHIC IMAGES

Summary

Thermography is one of the most dynamically developing domains of science, which allows us to carry out non-contact temperature measurement. It finds more often and often the application in machinery and apparatus diagnostics. With the use of a thermographic camera one can simultaneously observe the distribution of temperature in many points of an object, measure it and record in the form of a thermographic image. Immense informative potential of a thermographical image is a source of diagnostic information, which can be used in diagnosing of machines and apparatus. In order to extract this information, thermographical image analysis is necessary to be applied. In the article results of thermographical investigations were presented. The research consists in recording of thermographical images during operation of rotating machinery and their analysis with the use of statistical analysis methods of images.

Keywords: thermographical diagnostics, thermographic image analysis.

1. WSTĘP

Jednym z najstarszych i podstawowych sposobów diagnozowania stanu maszyn i urządzeń jest pomiar i ocena zmian wartości temperatury mierzonej w wybranych punktach badanego obiektu. Istnieje wiele sposobów pomiaru temperatury i zjawisk cieplnych zachodzących w obiektach technicznych [13]. Jedną z metod bezkontaktowego pomiaru temperatury jest termografia, która w ostatnim czasie, dzięki upowszechnieniu się urządzeń obrazowania podczerwieni, notuje bardzo dynamiczny rozwój [8] [10] [11]. Termografia ma zastosowanie tam, gdzie zmiana stanu obiektu może ujawnić się zmianą rozkładu temperatury na jego powierzchni. Szybki rozwój metod termograficznych obserwuje się w medycynie,

szczególnie w takich dziedzinach jak kardiologia, onkologia, dermatologia itp. [11] [6]. Termografia znalazła również szerokie zastosowanie w inżynierii materiałowej i w badaniach nieniszczących [4]. Urządzenia zobrazowań termalnych stosowane są w nadzorze i diagnozowaniu procesów przemysłowych i wytwórczych oraz różnego rodzaju obiektów technicznych, takich jak instalacje technologiczne, maszyny, konstrukcje mechaniczne, urządzenia elektryczne i elektroniczne, pojazdy, budowle i obiekty przemysłowe itp. [1] [8] [10]. Wyniki pomiarów termograficznych stanowią podstawę do analizy poprawności konstrukcji i procesów cieplnych zachodzących w obiektach oraz budowy modeli termicznych opisujących te procesy [8] [10].

Za pomocą kamery termowizyjnej możliwa jest jednoczesna obserwacja rozkładu temperatury w wielu punktach badanego obiektu i jednoczesny pomiar temperatury oraz jej rejestracja w postaci obrazu termograficznego. Ogromny potencjał informacyjny, jaki posiada obraz termograficzny, stanowi cenne źródło informacji diagnostycznych przydatnych w diagnozowaniu maszyn i urządzeń. W celu wydobycia tych informacji konieczne jest prowadzenie analizy obrazu termograficznego.

W artykule przedstawiono wyniki badań termograficznych polegających na wyznaczeniu wybranych cech statystycznych serii obrazów termograficznych rejestrowanych w równoodległych chwilach czasu podczas działania maszyny wirnikowej.

2. DIAGNOZOWANIE MASZYN NA PODSTAWIE TERMOGRAMÓW

Termografia znajduje szerokie zastosowanie w ocenie stanu technicznego różnych obiektów technicznych [1] [8]. Badania termograficzne wybranych obiektów realizowane są jednorazowo lub cykliczne i zwykle polegają na kontrolnej ocenie poprawności wykonania remontu, modernizacji obiektu lub mają na celu potwierdzenie istnienia i oszacowania stanu przedawaryjnego. Inspekcja termograficzna obiektu związana jest z realizacją następujących zadań [8]:

- opisem obiektu,
- wykonaniem pomiaru termowizyjnego,
- wykonaniem zdjęcia obiektu w paśmie widzialnym,
- zarejestrowaniem obrazu termalnego,
- opracowaniem termogramu,
- interpretacją wyników pomiarów,
- opracowaniem raportu.

W tego typu badaniach istotnym zadaniem jest poprawna analiza termogramów pozyskanych w trakcie badań. Czynność ta zwykle ograniczona jest do wizualnej inspekcji rozkładu temperatury i identyfikacji wartości temperatur w punktach gorących, a poprawność analizy zależy od doświadczenia i wiedzy osoby prowadzącej badania. Analiza termogramów wspomagana jest również prostymi metodami analizy obrazów polegających na stosowaniu progowania, wyznaczaniu histogramu obserwacji profilu temperaturowego wzdłuż zadanej prostej itp. Metody te zwykle są zaimplementowane w oprogramowaniu dostarczonym przez wytwórcę kamery [8] [10]. W ramach badań prowadzonych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn dostrzeżono możliwość wzbogacenia dziedziny nauki, jaką jest diagnostyka maszyn, o metody diagnostyczne bazujące na wynikach analizy obrazów termograficznych.

2.1. Założenia badawcze

Każda działająca maszyna i urządzenie posiada określony stan cieplny, który prawie zawsze zmienia się w trakcie eksploatacji obiektu. Na zmiany stanu cieplnego obiektów w maszynie mogą mieć wpływ różne czynniki, m.in.:

- Naturalne procesy zużycia.
- Kontrolowane zmiany w sterowaniu maszyny dokonane celowo przez operatora.
- Niekontrolowane zmiany w sterowaniu maszyny wynikające z uszkodzeń napędu i urządzeń sterujących.
- Pojawienie się niesprawności elementów maszyny i zakłócenia w ich wzajemnym współdziałaniu.
- Zaburzenia w przepływie mediów roboczych.

Zmiany stanu cieplnego obiektu najczęściej objawiają się zmianą rozkładu wartości temperatury w przestrzeni wewnętrznej jak i na powierzchni zewnętrznej maszyny. Dynamika tych zmian może być różna. Wolne zmiany stanu cieplnego mogą świadczyć o postępującym procesie zużycia, natomiast szybkie zmiany będą wskazywały na anomalie w przepływie energii cieplnej wynikające z wystąpienia stanów przedawaryjnych lub poważnych uszkodzeń.

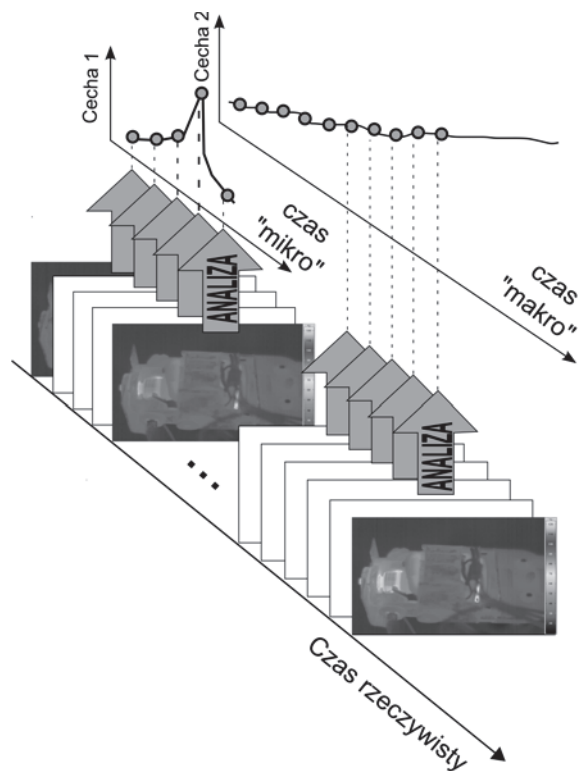
Aby badania diagnostyczne z zastosowaniem termowizji mogły być prowadzone w sposób skuteczny, konieczne staje się przyjęcie założenia, że obserwacja obiektu i zjawisk cieplnych w nim zachodzących powinna być prowadzona w trakcie jego eksploatacji w sposób ciągły lub na tyle częsty, aby możliwa była identyfikacja zmian w czasie wartości termicznych parametrów diagnostycznych identyfikowanych na podstawie zarejestrowanych obrazów termograficznych. Ponadto celowym wydaje się przyjęcie stosowanego w diagnostyce umownego podziału dziedziny czasu rzeczywistego na czas „mikro” (dynamiczny) i czas „makro” (eksploatacyjny), [2] co pozwoli na rozpatrywanie i analizę szybko zmieniających się procesów cieplnych oraz procesów wolnozmiennych.

Przykładem procesu szybkozmiennego może być chwilowa anomalia cieplna (np. łuk elektryczny), zarejestrowana na kilku obrazach termograficznych. Sekwencja taka poddana szczegółowej analizie pozwoli na identyfikację charakteru tej anomalii.

Proces wolnozmienny może być opisany przez np. funkcję opisującą zmianę wartości temperatury jednego punktu obiektu technicznego zidentyfikowaną na podstawie dużej liczby zarejestrowanych obrazów termograficznych. Analiza procesu wolnozmiennego pozwoli na pozyskanie informacji o procesach zużycia i prognozowanie wystąpienia możliwej awarii.

W obu przypadkach, poprzez analizę termogramów i wyznaczenie ich parametrów diagnostycznych (cech), możliwe jest pozyskanie sygnałów diagnostycznych, które mogą stać się podstawą dalszej analizy (Rys. 1).

W oparciu o tak przyjęte założenia proces wnioskowania diagnostycznego można rozdzielić na dwa etapy. Pierwszy etap związany jest z wyznaczaniem parametrów diagnostycznych w wyniku analizy pojedynczych termogramów z zastosowaniem odpowiednich metod analizy obrazu. Drugi etap dotyczy analizy zmienności wyznaczonych parametrów diagnostycznych w czasie „mikro” i w czasie „makro” z zastosowaniem odpowiednich metod analizy sygnałów.



Rys. 1. Analiza sekwencji obrazów termograficznych w czasie „mikro” i „makro”

3. TERMOGRAM I MOŻLIWOŚCI JEGO ANALIZY

Obraz termograficzny można potraktować jako obraz cyfrowy opisany za pomocą dyskretnej funkcji temperatury dwóch zmiennych. Zmiennymi są współrzędne płaskiego układu współrzędnych opisujących rozdzielczość przestrzenną obrazu [8].

Obraz termograficzny jest cennym nośnikiem wielu różnych informacji o stanie cieplnym obiektu. W zależności od sposobu uformowania może zawierać nie tylko informacje o rozkładzie temperatury na powierzchni badanego obiektu, ale również informacje o temperaturze otoczenia obiektu i otaczających go innych obiektów. Na obrazie termograficznym można również zarejestrować rozkłady temperatur kilku obiektów tej samej klasy (np. kilku takich samych zespołów maszynowych np. pomp)

Ze względu na dużą pojemność informacyjną termogramów, istotne staje się poszukiwanie informacji istotnych i ważnych z punktu widzenia

identyfikacji zmian stanu technicznego. Aby możliwe było pozyskanie tego typu informacji, możliwe jest stosowanie różnych metod analizy obrazów, gdyż analiza i przetwarzanie obrazów umożliwia identyfikację takich różnic w obrazach, które nie są rozpoznawalne dla ludzkiego wzroku [3] [11] [12] [14] [15] [16].

Termogramy mogą być traktowane jak obrazy rejestrowane przy oświetleniu widzialnym i poddane procesowi:

- przetwarzania (np. przekształcenia obrazów, filtracja),
- analizy (np. segmentacja, lokalizacja obiektów, wyznaczanie charakterystycznych cech obrazów),
- rozpoznawania, którego celem jest klasyfikacja obrazów lub obiektów scharakteryzowanych za pomocą wyznaczonych cech.

Do przetwarzania obrazów termograficznych mogą być zastosowane klasyczne metody, takie jak analiza bezkontekstowa [3] [15] [16] oraz analiza kontekstowa [3] [15] [16], obejmująca dużą grupę metod, których celem jest polepszenie jakości obrazów i zwiększenie możliwości metod rozpoznawania obrazów, stosowanych w kolejnych etapach. Kluczowym etapem analizy termogramów jest określenie zbioru cech charakteryzujących obraz termograficzny, pozwalający na identyfikację relacji diagnostycznych, w których określone wartości cech obrazów są symptomami stanu technicznego obiektu.

3.1. Cechy obrazów termograficznych

Z obrazu termograficznego mogą być wyznaczone cechy jakościowe oraz z cechy ilościowe. Wśród cech jakościowych można wyróżnić takie jak, np.: ujawnianie się punktów lokalnych o odmiennej charakterystyce cieplnej, podwyższona temperatura w określonym obszarze maszyny. Z punktu widzenia automatyzacji zadań diagnozowania duże znaczenie mają cechy ilościowe, które można podzielić na cechy bezwzględne i cechy względne. Cechy bezwzględne można wyznaczyć bezpośrednio na podstawie obrazów termograficznych obserwowanego obiektu w czasie „mikro”, czyli w krótkiej chwili nieprzekraczającej 60 s. Mogą to być np. średnie wartości temperatur, różnica średnich wartości temperatur między określonymi obszarami obrazu termograficznego itp.

Jako cechy względne należy rozumieć cechy, które mogą być wyznaczone na podstawie danych pochodzących z różnych pomiarów wykonanych w różnych chwilach czasu „makro”. Mogą to być również cechy wynikające z porównania pewnych parametrów cieplnych z tymi samymi parametrami wyznaczonymi na podstawie modeli numerycznych.

Istnienie obrazu termograficznego jako zbioru uporządkowanych wartości, np. temperatury, ułożonych na płaszczyźnie opisanej przez

odpowiednio wyskalowany układ współrzędnych, umożliwia pozyskanie geometrycznych cech ilościowych. opisujących np. zmiany we wzajemnym położeniu obszarów o danej temperaturze. Pozyskiwanie cech obrazów termograficznych związane jest ze stosowaniem różnych metod ich wyznaczenia. Aktualne dokonania w dziedzinie medycznej diagnostyki termograficznej oferują szeroki zakres metod analizy i przetwarzania obrazów termograficznych [11] [12] [16]. W obrębie termografii statycznej i dynamicznej istnieje wiele metod pozwalających na wyznaczenie cech w dziedzinie amplitud i w dziedzinie częstotliwości. W metodach tych wykorzystuje się zarówno wiedzę związaną z zagadnieniami termodynamicznymi, jak również z zagadnieniami rozpoznawania, przetwarzania i analizy obrazów.

Dla celów oceny słuszności przyjętych założeń dotyczących możliwości diagnozowania maszyn na podstawie obrazów termograficznych przyjęto, że wstępnie rozpatrywane będą, dalej opisane, cechy statystyczne. W celu ich wyznaczenia konieczne było pozyskanie reprezentatywnego zbioru termogramów, który zarejestrowano w trakcie prowadzenia czynnego eksperymentu diagnostycznego.

4. EKSPERYMENT BADAWCZY

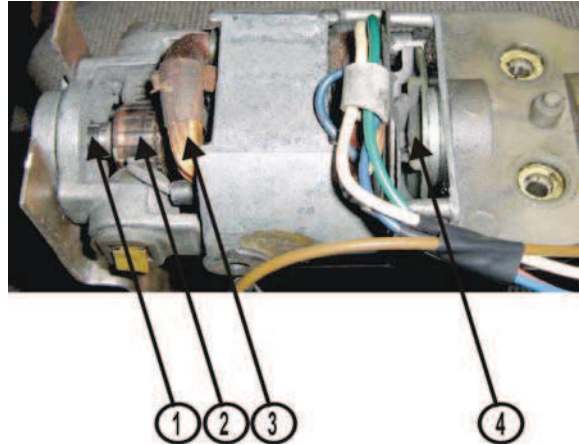
Określenie przydatności stosowania termogramów w diagnostyce technicznej maszyn wymaga ich zgromadzenia i oceny. Zdecydowano się na przeprowadzenie czynnego eksperymentu diagnostycznego na stanowisku badawczym wyposażonym w obiekt badań i kamerę termowizyjną współpracującą z komputerem klasy PC.

4.1. Obiekt badań

Obiektem badań był jednofazowy silnik komutatorowy, pochodzący z uszkodzonego robota kuchennego i przystosowany do eksperymentu diagnostycznego. Stan techniczny silnika uznano za dostateczny. Głównymi czynnikami wpływającymi na stan techniczny silnika były zużyte szczotki komutatora i zużyte łożyska ślizgowe wirnika. Badany silnik przystosowany był do pracy przerywanej 2-10 minut, jego moc maksymalna wynosiła $P_{\max}=160$ [W], napięcie znamionowe $U_z=220$ [V]. Odczepy uzwojenia stojana umożliwiały zmianę prędkości obrotowej silnika w trzech zakresach.

Po wstępnej obserwacji działania silnika zdecydowano, że interesującymi z punktu widzenia obserwacji termograficznej obszarami badań będą (Rys. 2):

- 1) Obszar łożyska ślizgowego.
- 2) Obszar komutatora.
- 3) Obszar uzwojenia stojana.
- 4) Obszar wentylatora.



Rys. 2. Badany silnik wraz z zaznaczonymi obszarami zainteresowania

4.2. Przebieg badań i pozyskane dane

Badania przeprowadzono w laboratorium KPKM na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku według wcześniej przygotowanego planu. Plan badań zakładał przeprowadzenie serii eksperymentów, podczas których dokonywano pomiarów termograficznych i rejestracji serii termogramów w trakcie działania obiektu w różnych stanach eksploatacyjnych wynikających ze zmiany obciążenia silnika i zmiany jego prędkości obrotowej. Zmiany stanu obciążenia silnika realizowano przez zmianę gęstości miksowanej mieszanki mąki i wody. W tabeli 1 zamieszczono opis przestrzeni eksperymentalnej [5].

Tabela 1. Przestrzeń eksperymentalna

Nr eksperymentu	Nr prędkości obrotowej	Nr stanu obciążenia
1	1	0
2	2	0
3	3	0
4	1	1
5	2	1
6	3	1
7	1	2
8	2	2
9	3	2
10	1	3
11	2	3
12	3	3

W trakcie każdego z eksperymentów rejestrowano 11 termogramów z równym odstępem czasowym, co 6 [s].

Zarejestrowane serie obrazów termograficznych poddano wstępnej analizie za pomocą firmowego oprogramowania współpracującego z posiadaną kamerą termowizyjną. Pozwoliło to na wybór przykładu, w którym na zarejestrowanej serii obrazów termograficznych można zaobserwować symptomy świadczące o wystąpieniu jak największej liczby różnych możliwych uszkodzeń. Wstępna analiza umożliwiła zidentyfikowanie serii

obrazów, na których zaobserwowano zbiór następujących termicznych symptomów diagnostycznych:

- S1 - wzrost temperatury w okolicach wentylatora będący wynikiem przycierania wentylatora o korpus silnika.
- S2 - wzrost temperatury komutatora oraz łożyska ślizgowego.
- S3 – gwałtowny wzrost temperatury w okolicy komutatora będący wynikiem zjawiska komutacji charakteryzującym się m.in. wystąpieniem łuku elektrycznego między szczotkami i komutatorem .
- S4 – podwyższona temperatura w okolicy łożyska będąca wynikiem zatarcia łożyska wirnika.

5. ANALIZA ZMIAN WYZNACZONYCH CECH OBRAZÓW TERMOGRAFICZNYCH

Zarejestrowaną sekwencję obrazów termograficznych zgodnie z przyjętymi założeniami poddano analizie poprzez zastosowanie statystycznych metod analizy obrazów termograficznych, a następnie wyznaczono funkcje zmian wartości wyznaczonych parametrów w dziedzinie czasu. Ze względu na ograniczony czas trwania eksperymentu przyjęto, że czas trwania pojedynczego eksperymentu był czasem „makro”

5.1. Analiza statystyczna

Jedną z metod analizy obrazów termograficznych jest analiza statystyczna rozkładu wartości temperatury dla całego obrazu lub dla obszaru zainteresowania wskazanego na termogramie [12] [16]. Wydzielenie obszaru obrazu może się odbywać poprzez zastosowanie odpowiednich metod segmentacji lub przez subiektywny podział obrazu na obszary, dla których odrębnie dokonywana jest analiza statystyczna.

W celu ilościowej analizy porównawczej zdecydowano się na wyznaczenie następujących parametrów statystycznych wybranych obszarów zarejestrowanych obrazów termograficznych:

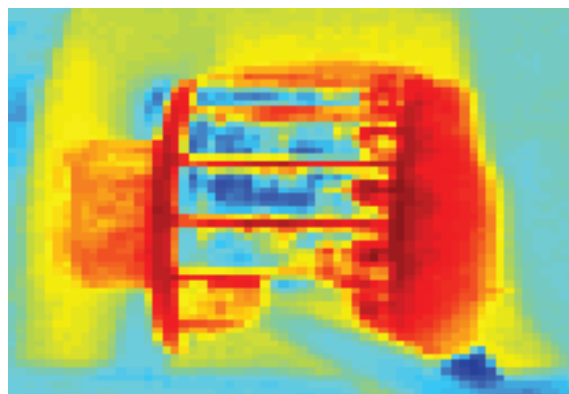
- wartość średnia (Ave),
- wartość skuteczna (RMS),
- wariancja (Var),
- wartość maksymalna (Max),
- wartość minimalna (Min),
- wartość międzyszczytowa (P-P).

Wybór powyższych cech statystycznych pozwalał sądzić, że na podstawie ich wartości będzie możliwa identyfikacja zmian stanu termicznego obiektów w kolejno zarejestrowanych obrazach w czasie.

Zarejestrowane w trakcie badań i wybrane obrazy poddano analizie w dwóch etapach. W pierwszym etapie dokonano oceny wydzielonego

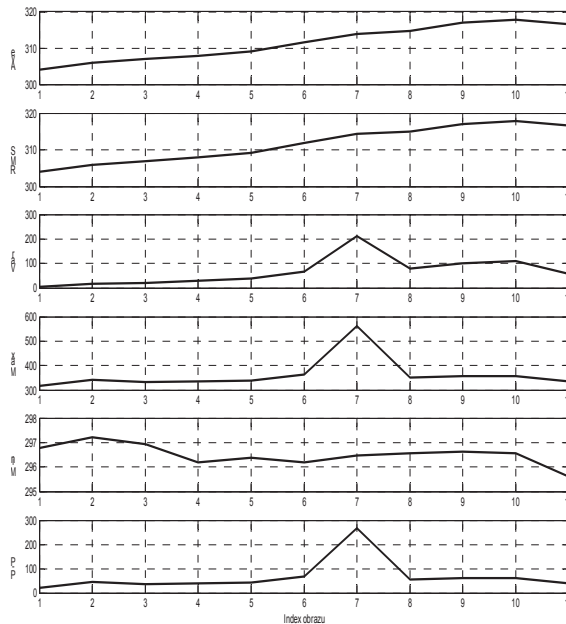
obszaru zainteresowania, w drugim etapie przeprowadzono blokową analizę statystyczną dla całego obrazu.

Obszarem zainteresowania wybranym do celów analizy w pierwszym etapie badań był obszar komutatora, szczotek i łożyska przedstawiony na Rys. 3.



Rys. 3. Wyselekcjonowany dla potrzeb analizy obszar zainteresowania

W wyniku analizy otrzymano wartości parametrów statystycznych dla każdego obrazu, z których możliwe było utworzenie sygnałów diagnostycznych jako funkcji zmian wartości tych parametrów w czasie (Rys. 4).



Rys. 4. Przebiegi zmienności wyznaczanych parametrów statystycznych I rodzaju w zależności od indeksu rejestrowanego obrazu

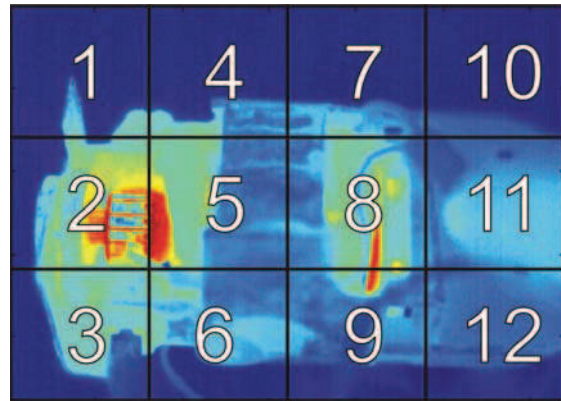
Jak można się było spodziewać, wyznaczone wartości takich cech statystycznych jak „wartość maksymalna”, „wariancja” i wartość „peak-peak” pozwoliły na skuteczną identyfikację stanu technicznego S3 związanego z szybkimi zmianami temperatury będącymi wynikiem wystąpienia łuku elektrycznego między szczotkami a komutatorem. Stan ten został zarejestrowany na obrazie o indeksie

nr 7. Identyfikacja wystąpienia łuku elektrycznego pozwala stwierdzić, że wyznaczone parametry statystyczne nadają się do analizy zjawisk cieplnych o dużej dynamice zachodzących w krótkim czasie. W przypadku sygnału opisującego zmienność wartości takich cech statystycznych jak wartość średnia „Ave” oraz wartość skuteczna „RMS” zaobserwowano, że ich wartości stopniowo wzrastały w czasie trwania obserwacji obiektu, aby osiągnąć wartość maksymalną dla obrazu o indeksie 10. Wzrost wartości parametrów w czasie wynikał z występowania i nasilania się symptomów związanych z istnieniem stanów technicznych S2 i S4. Stany te objawiały się na obrazach termograficznych stopniową ekspansją obszarów o podwyższonej temperaturze. Jak można się było spodziewać w przypadku ocen statystycznych „RMS” i „Ave”, przebiegi ich wartości są podobne, zatem mogą być one stosowane zamiennie do oceny zjawisk termicznych o charakterze wolnozmiennym wynikającym np. ze stopniowego nagrzewania się obserwowanych powierzchni obiektu.

Spośród wyznaczanych cech statycznych wybranego obszaru zainteresowania serii obrazów termograficznych na szczególną uwagę zasługuje wariancja. Analiza zmienności wartości tej cechy w czasie pozwala na stwierdzenie, że cecha ta może być przydatna zarówno do analizy procesów termicznych o charakterze szybko jak i wolnozmiennych.

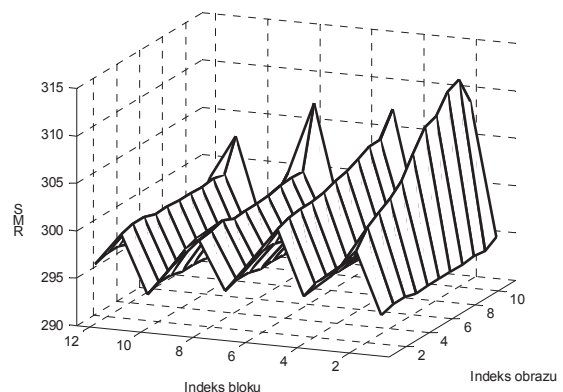
Drugi etap badań nad stosowaniem analizy statystycznej polegał na zastosowaniu równomiernego podziału obszaru każdego z zarejestrowanych obrazów na bloki o wymiarach 80x80 pikseli oraz wyznaczeniu dla każdego obszaru opisanego przez blok wartości wcześniej wskazanych cech statystycznych. Każdemu z bloków nadano indeksy o wartościach od 1 do 12 według sposobu pokazanego na Rys. 5.

W wyniku analizy obszaru obrazu w każdym z zaznaczonych bloków otrzymano wielowymiarową przestrzeń wartości cech. W celu analizy charakteru zmienności parametrów statystycznych ich wartości przedstawiono w postaci wykresów trójwymiarowych opisujących zmiany wartości każdego z parametrów w funkcji dwóch zmiennych - indeksu obrazu i indeksu bloku. Przykładowe funkcje opisujące zmiany parametrów „RMS”, „Var” i „P-P” przedstawiono kolejno na Rys. 6, Rys. 7, Rys. 8.



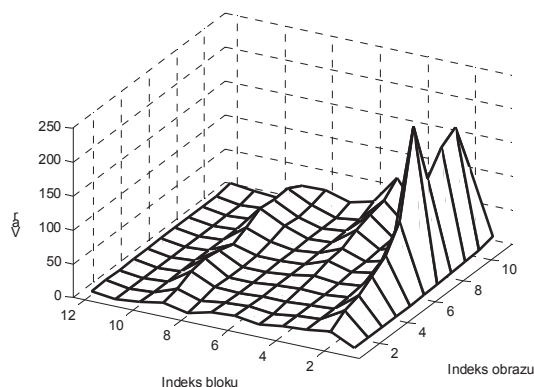
Rys. 5. Schemat podziału zarejestrowanych obrazów termograficznych na równomierne obszary zainteresowania

Dostrzeżono, że największą dynamikę zmian wartości wyznaczanych cech statystycznych zaobserwowano w blokach o indeksach 2, 5, 8 i 9. Jak można się było spodziewać, w bloku nr 2, obejmującym obszar komutatora i szczotek, można zaobserwować największy zakres zmian procesów cieplnych w trakcie działania obiektu, zatem i dynamika zmian wyznaczanych parametrów statystycznych była największa. Blok nr 5 częściowo obejmował obszar komutatora, co również znalazło odzwierciedlenie w podwyższonych wartościach parametrów statystycznych. Wystąpienie stanu technicznego S1 objawiające się powstaniem obszarów o podwyższonej temperaturze w obszarze wentylatora silnika obejmowanych przez bloki 8 i 9 spowodowało, podobnie jak w przypadku bloków nr 2 i 5, podwyższenie wartości i dynamiki zmian parametrów statystycznych. Wzrost tych wartości obserwowalny był szczególnie dla obrazów o wysokich indeksach, gdyż przycieranie wentylatora wystąpiło pod koniec trwania obserwacji obiektu.

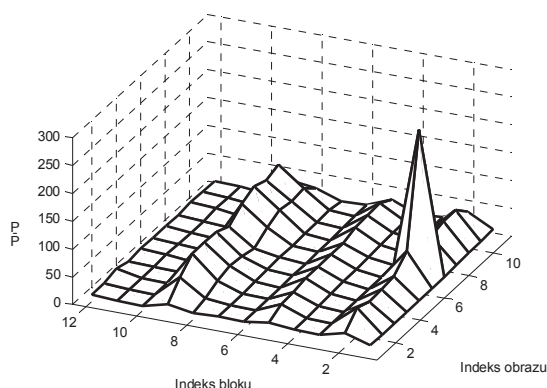


Rys. 6. Przebieg zmienności parametru statystycznego RMS w funkcji indeksu obrazu i indeksu obszaru analizowanego obrazu

Analiza przydatności zastosowania poszczególnych parametrów statystycznych podczas analizy blokowej dała podobne wyniki jak w przypadku wcześniejszej analizy wybranego obszaru zainteresowania.



Rys. 7. Przebieg zmienności parametru statystycznego Wariancja w funkcji indeksu obrazu i indeksu obszaru analizowanego obrazu



Rys. 8. Przebieg zmienności parametru statystycznego Wariancja w funkcji indeksu obrazu i indeksu obszaru analizowanego obrazu

Zastosowanie podziału obrazu na równe obszary analizy miało na celu ocenę możliwości przyszłego automatycznego doboru obszaru zainteresowania na podstawie analizy zmienności parametrów statystycznych w segmentach obrazu.

5.2. Analiza statystyczna II rodzaju

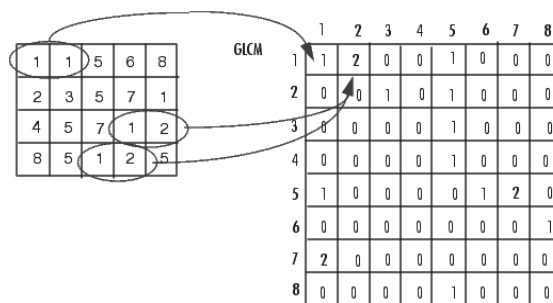
Często stosowaną metodą analizy medycznych obrazów termograficznych [12] jest zastosowanie macierzy zdarzeń i wyznaczenie na jej podstawie parametrów statystycznych II rodzaju takich jak:

- kontrast (Ctr),
- korelacja (Cor),
- energia (drugi moment zwykły) (Enr),
- entropia (Ent),
- inercja (wariacja) (Inr),
- spójność (odwrotny moment różnicowy) (Hom),
- kowariancja (Cov).

Macierz zdarzeń wyznaczana jest na podstawie analizowanego obrazu o znanej liczbie M poziomów. Rozmiar macierzy zdarzeń przyjmuje rozmiar $M \times M$, gdzie wartość każdego z jej

elementów (m, n) wskazuje, ile razy w analizowanym obrazie występuje sąsiedztwo dwóch pikseli odpowiednio o wartościach m, n . Sąsiedztwo pikseli jest określane przez kierunek oraz odległość.

W praktyce przetwarzania obrazów stosuje się uproszczenia i obliczenia prowadzone tylko dla jednego kierunku i jednej odległości. W większości przypadków stosowany jest kierunek poziomy i odległość równa 1. Na Rys. 9 przedstawiono przykład wyznaczania macierzy zdarzeń dla obrazu o liczbie poziomów 8.



Rys. 9. Sposób wyznaczania macierzy zdarzeń [9]

Macierz zdarzeń często poddaje się normalizacji tak, aby zamiast sumy wystąpień dostać ich prawdopodobieństwa. W tym celu należy podzielić wszystkie elementy macierzy przez liczbę wszystkich możliwych kombinacji par wartości (m, n) . Macierz zdarzeń można opisać za pomocą funkcji trzech zmiennych oraz zapisać w postaci [11]:

$$c_{m,n} = p(m,n,d) = \frac{L_{m,n}}{N} d$$

gdzie:

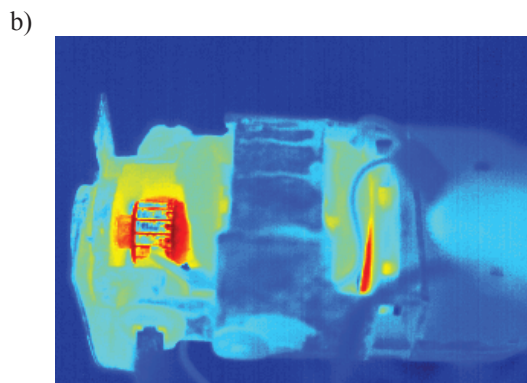
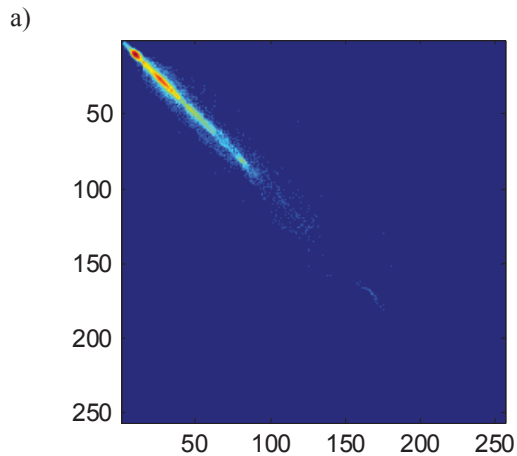
$p(m,n,d)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia w obrazie punktów o wartościach odpowiednio m oraz n w określonej odległości d ,

L_{mn} – liczba takich par,

N – liczba wszystkich możliwych par leżących w zadanej odległości d ,

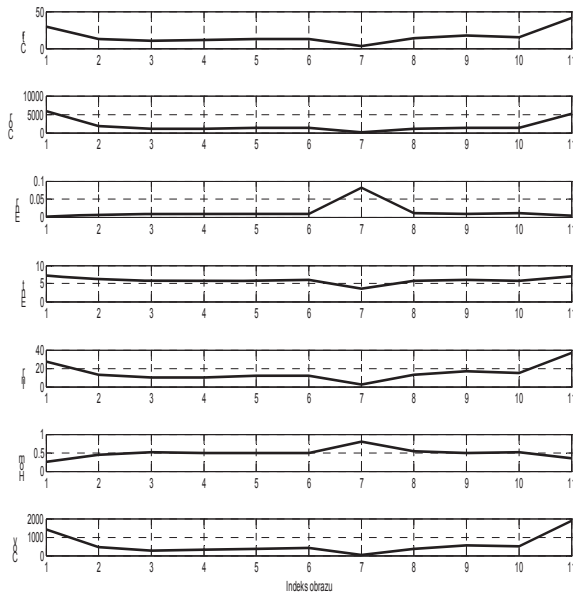
d – odległość; najczęściej równa jedynce.

Na Rys. 10 przedstawiony został przykładowy obraz termograficzny wraz z wyznaczoną dla niego macierzą zdarzeń.



Rys. 10. Przykład wyznaczonej macierzy zdarzeń a) dla obrazu termograficznego badanego obiektu b)

Dla zarejestrowanej sekwencji obrazów wyznaczono macierze zdarzeń i obliczono parametry statystyczne drugiego rodzaju. Funkcje zmienności wartości tych parametrów w zależności od indeksu obrazu zaprezentowano na Rys. 11.



Rys. 11. Przebieg wartości wyznaczanych parametrów statystycznych II rodzaju w funkcji indeksów zarejestrowanych obrazów

Analiza przebiegów wartości parametrów statystycznych II rodzaju wskazuje na możliwość wykrywania gwałtownych zjawisk cieplnych, które w przypadku prowadzonych badań były łukiem elektrycznym obserwowanym na obrazie o indeksie nr 7. Dla tego obrazu dostrzegalne są wyraźne skoki wartości wyznaczanych parametrów statystycznych. Pomimo przydatności tych parametrów do analizy procesów nagłych niosących ze sobą dużą ilość energii, wyznaczone cechy termogramów nie wykazują przydatności do identyfikacji procesów wolnozmiennych, w których wartości temperatur stopniowo rosną.

5.3. Analiza z zastosowaniem ZRWTI

Jedną z metod analizy termogramów, która może znaleźć zastosowanie w ocenie zmian stanu technicznego maszyn, może być metoda bazująca na zastosowaniu znanego w termografii impulsowej – Znormalizowanego Różnicowego Współczynnika Termografii Impulsowej (ZRWTI). Współczynnik ten wyznaczany jest na podstawie dwóch termogramów z serii pomiarowej. Pierwszy z nich, w przypadku badań diagnostycznych, dotyczy obrazu termograficznego zarejestrowanego na początku obserwacji obiektu, natomiast drugi obraz rejestrowany jest w kolejnej chwili obserwacji obiektu. Znormalizowany Różnicowy Współczynnik Termografii Impulsowej (ZRWTI) określony jest następującym wzorem:

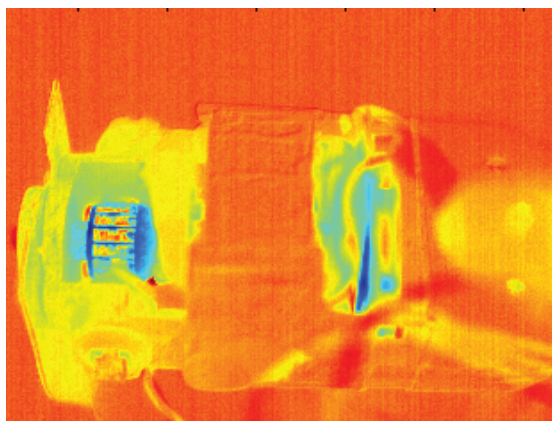
$$ZRWTI(x, y, t) = \frac{T(x, y, t_0) - T(x, y, t_i)}{T(x, y, t_0) + T(x, y, t_i)}$$

gdzie:

$T(x, y, 0)$ – wartość temperatury w danym punkcie (x, y) dla termogramu bazowego zarejestrowanego w początkowej chwili czasu obserwacji $t_0=0$;

$T(x, y, t)$ – wartość temperatury w danym punkcie (x, y) dla termogramu w zarejestrowanego dowolnej chwili $t_i \neq t_0$

Współczynnik ZRWTI poprzez porównanie rozpatrywanego termogramu w stosunku do termogramu odniesienia pozwala na wykrycie obszarów rozkładu temperatury, które mogą wskazywać na wystąpienie uszkodzenia. Wynikiem obliczenia ZRWTI jest również obraz (Rys. 12), którego analiza wymaga doświadczenia i wiedzy o własnościach i właściwościach badanego obiektu.

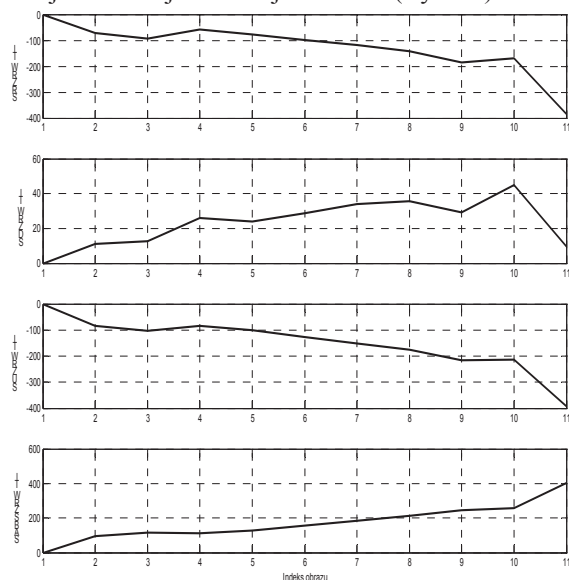


Rys. 12. Znormalizowany różnicowy współczynnik termografii impulsowej dla wybranego obrazu termograficznego badanego obiektu

Dla potrzeb oceny zmian stanu technicznego badanego obiektu zaproponowano, że współczynnik ZRWTI będzie wyznaczany pomiędzy pierwszym obrazem w serii i każdym następnym. Na podstawie wyznaczonych obrazów różnicowych ZRWTI wyznaczano następujące cztery cechy liczbowe:

- suma wartości różnicowych ZRWTI (SR),
- suma wartości dodatnich ZRWTI (SD),
- suma wartości ujemnych ZRWTI (SU),
- suma wartości bezwzględnych ZRWTI (SABS).

Wartości wyznaczonych cech obrazów różnicowych przedstawiono jako funkcje indeksów zarejestrowanej sekwencji obrazów (Rys. 13).



Rys. 13. Cechy liczbowe wyznaczone dla obrazów różnicowych powstałych w wyniku zastosowania współczynnika ZRWTI wobec zarejestrowanej sekwencji obrazów termograficznych

Analiza przebiegów wyznaczonych cech obrazów różnicowych wskazuje na istnienie dużej dynamiki zmian wartości cech w zależności od indeksu rejestrowanego obrazu. Dostrzegalny jest wyraźny trend zmian wartości cech wraz ze wzrostem czasu eksploatacji, a tym samym wraz z kumulowaniem się w obiekcie zużycia, objawiającego się stopniowym wzrostem temperatury. Wyznaczone cechy mają jedną wadę, nie można na podstawie przebiegu zmienności ich wartości zidentyfikować zjawisk szybkozmiennych o dużej energii takich jak np. łuk elektryczny.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach opisanych badań przeprowadzono czynny eksperyment diagnostyczny mający na celu pozyskanie serii obrazów termograficznych. Pozyskane obrazy poddano analizie z zastosowaniem wybranych statystycznych metod analizy obrazów w celu wyznaczenia zbioru cech statystycznych. Wyznaczony zbiór cech statystycznych dla serii obrazów zarejestrowanych w czasie posłużył do weryfikacji założeń dotyczących możliwości oceny stanu technicznego obiektu na podstawie jego ciągłej obserwacji termograficznej.

Zaobserwowano, że na podstawie wybranych statystycznych cech obrazów termograficznych możliwa jest identyfikacja zarówno szybkozmiennych jak i wolnozmiennych procesów cieplnych zachodzących w maszynie. Jako cechy, pozwalające na dobrą identyfikację zmian stanu technicznego, można wskazać wariancję oraz współczynnik ZRWTI.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że duży wpływ na wartości pozyskiwanych cech ma wybór obszaru zainteresowania analizowanego obrazu. Czynność ta wymaga znajomości własności i właściwości badanego obiektu oraz określenia obszarów, w których prawdopodobieństwa ujawnienia się cieplnych symptomów uszkodzeń jest duże. Pewnym sposobem uniknięcia problemu wyboru obszaru zainteresowania jest zastosowanie metod segmentacji obrazu, które w oparciu o przyjęte kryteria, pozwolą na optymalny wybór obszaru zainteresowania. Podczas badań przeprowadzono prostą segmentację obrazu na równomierne bloki, dla których niezależnie wyznaczano cechy diagnostyczne. Uzyskane wyniki wskazują, że konieczne jest podjęcie dodatkowych badań nad metodami segmentacji obrazów termograficznych przy jednoczesnym dalszym poszukiwaniu metod wyznaczania cech obrazów termograficznych, które mogłyby być podstawą do dalszych badań nad wyborem optymalnej przestrzeni cech dla potrzeb diagnostyki. Optymalnie dobrany zbiór cech jest podstawą do określenia zbioru relacji diagnostycznych wybranego obiektu i opracowania metody diagnostycznej, mogącej znaleźć zastosowanie w systemie diagnozującym czas rzeczywisty.

LITERATURA

- [1] Cempel Cz., Tomaszewski F. (red) *Diagnostyka Maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*. MCNEMT, Radom 1992.
- [2] Cholewa W.: *Metoda diagnozowania maszyn z zastosowaniem zbiorów rozmytych*. Zeszyty Naukowe Nr 764. Politechnika Śląska, Gliwice 1983.
- [3] Gonzales C. R., Wintz P.: *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- [4] Galewicz G., Więcek B., Owczarek G.: *Zastosowanie termografii w badaniach nieniszczących*. Elektronika. Prace naukowe. Zeszyt nr 9. Wydawnictwo „CMYK” Łódź 2004.
- [5] Jabłonka K.: *Ocena przydatności wybranych metod analizy obrazów do analizy obrazów termograficznych*. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice 2006.
- [6] Jakubowska T., Więcek B., Peszyński – Drews C., Wysocki M.: *Zastosowanie statystycznych parametrów obrazów termograficznych do wczesnej diagnostyki zmian chorobowych piersi*. Referat z V krajowej konferencji: Termografia i termometria w podczerwieni. Ustroń 2002.
- [7] Kocyba K.: *Sygnatura termalna obiektu przemysłowego i system diagnostyczny z bazą danych sygnatur*. VI Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni, Ustroń-Jaszowiec, 4-6 listopada 2004.
- [8] Madura H.: *Pomiary termowizyjne w praktyce*. Praca zbiorowa. Agencja wydawnicza PAK, Warszawa 2004.
- [9] Mathworks. *Pomoc programu Matlab*.
- [10] Minkina W.: *Pomiary termowizyjne: przyrządy i metod.*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2004.
- [11] Nowakowski A.: *Postępy termografii – aplikacje medyczne*. Wydawnictwo Gdańskie. Gdańsk 2001.
- [12] Praca zbiorowa. *Przetwarzanie obrazów termograficznych w zastosowaniach medycznych*. Prace naukowe. Zeszyt nr 9. Wydawnictwo „CMYK” Łódź 2004.
- [13] Praca zbiorowa. *Pomiary cieplne*. Część I. WNT, Warszawa 1993.
- [14] Tadeusiewicz R., Korohoda P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji. Kraków 1997.
- [15] Wróbel Z., Koprowski R.: *Praktyka przetwarzania obrazów w programie Matlab*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2004.
- [16] Wróbel Z., Koprowski R.: *Przetwarzanie obrazów termograficznych*. Referat z VI krajowej konferencji Termografia i termometria w podczerwieni. Ustroń 2004.



Dr inż. **Marek FIDALI** pracuje w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn na stanowisku adiunkta. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia analizy sygnałów, diagnostyki technicznej maszyn, analizy modalnej, akustyki i termografii.