

Zastosowanie termowizji do detekcji nieszczelności w sektorze motoryzacyjnym

Wojciech Macherzyński¹, Marcin Ochman^{2,3}, Zbigniew Kulas², Krzysztof Dudek², Mateusz Didyk², Dawid Sroczyński²

¹ Katedra Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, Politechnika Wrocławska

² Unitem sp. z o.o., Kominiarska 42C, 51-180 Wrocław

³ Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania, Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławska

Streszczenie: Coraz bardziej rygorystyczne wymagania w zakresie ochrony środowiska, bezpieczeństwa czy niezawodności wymuszają na firmach z sektora motoryzacyjnego stosowanie efektywniejszych testów potwierdzających wymaganą szczelność komponentów (chłodnic, zbiorników, sprężyn powietrznych itp.). Obecnie stosowane metody niosą ze sobą ograniczenia, które generują otwartość przemysłu motoryzacyjnego na zupełnie nowe sposoby realizacji pomiaru nieszczelności. Zastosowanie kamer termowizyjnych do pomiaru energii cieplnej jest obecnie powszechną praktyką w wielu dziedzinach, a zastosowanie ich do pomiaru nieszczelności zamkniętych ustrojów pozwoliłoby na znaczne skrócenie czasu pomiarów w przypadku zbiorników odkształcalnych, wymagających długich czasów stabilizacji w metodach konkurencyjnych. W artykule opisano zastosowanie termowizji do wykrywania nieszczelności sprężyn gazowych.

Słowa kluczowe: detekcja nieszczelności, lokalizacja nieszczelności, termowizja, algorytm klasyfikacji nieszczelności

1. Wprowadzenie

W ostatniej dekadzie polski przemysł motoryzacyjny odnotował stu procentowy wzrost mierzony produkcją sprzedaną. Sektor motoryzacyjny stanowi drugi pod względem wielkości sektor w Polsce¹. Na branżę motoryzacyjną składają się nie tylko producenci samochodów, ale również silników, komponentów i części.

Coraz bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące ochrony środowiska, bezpieczeństwa oraz niezawodności wymuszają na firmach z branży automotive inwestycje m.in. w coraz doskonalsze metody badania szczelności elementów, dla których jest ona wymagana. Jednym z podstawowych aspektów ciągłego doskonalenia się branży w tym aspekcie, poza doskonaleniem metod samej produkcji, jest zapewnienie w cyklu produkcyjnym systemów wykrywania nieszczelności o jak najwyższej jakości i wydajności. Co więcej, poszukiwane są metody, które przy wysokiej jakości testu nie powodowałyby jednocześnie wzrostu kosztów produkcji, czy to ze względu na koszty generowane bezpośrednio przez samą metodę, czy też ze względu na zmniejszenie wydaj-

ności całego procesu produkcji np. z uwagi na zbyt długi czas poświęcany na pomiar.

Obecnie stosowane podejścia, ze względu na ograniczenia technologiczne czy też fizyczne, nie zawsze pozwalają skutecznie odpowiadać na rosnące wymagania wskazane powyżej. Stąd widoczne jest dążenie branży do poszukiwań nowych rozwiązań w przedmiotowym zakresie. To z kolei napędza obecnych dostawców systemów/urządzeń pomiaru nieszczelności do ciągłego uaktualniania swojej oferty i tworzenia coraz nowszych generacji swoich produktów. Podkreślić jednak należy, że są to przede wszystkim nowsze generacje aparatury bazującej jednak na tej samej technologii, tj. w przypadku sektora motoryzacyjnego, na pomiarze spadku ciśnienia lub wykrywaniu gazu znakującego (np. helu). Przytoczone metody niosą za sobą ograniczenia, które generują otwartość przemysłu na zupełnie nowe metody bazujące na innych rozwiązaniach.

2. Wykrywanie nieszczelności

Wyróżniamy trzy rodzaje nieszczelności: rzeczywiste, pozorne i wynikające z przenikania gazu przez materiał zbiornika. Przy czym nieszczelności pozorne związane z obecnością gazów zaadsorbowanych na wewnętrznych powierzchniach badanych zbiorników oraz nieszczelności wynikające z przenikania gazów przez materiał mają znaczenie w konstrukcji m.in. aparatury próżniowej, natomiast w wykrywaniu nieszczelności komponentów z sektora motoryzacyjnego są pomijalnie małe i można je na ogół zaniedbać. Nieszczelności rzeczywiste występują najczęściej w sąsiedztwie połączeń i są zwykle wynikiem popełnionych błędów konstrukcyjnych, technologicznych czy też

¹ www.paih.gov.pl/sektory/motoryzacja

Autor korespondujący:

Wojciech Macherzyński, wojciech.macherzynski@pwr.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 05.07.2021 r., przyjęty do druku 10.08.2021 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

montażowych, a tylko w nielicznych przypadkach ukrytych wad materiałowych. Warto podkreślić, że nieszczelność jest cechą każdego obiektu niezależnie od materiału i technologii wykonania. W układach dynamicznych, gdy badany obiekt współpracuje z kompresorem lub pompą, nieszczelność ograniczają odpowiednio maksymalne lub minimalne uzyskiwane ciśnienia. Z kolei w układach statycznych, gdzie po odpompowaniu bądź napełnieniu zbiornik zostaje odłączony, ciśnienie wewnątrz układu (zbiornika) zaczyna zmieniać się, aż wreszcie osiąga wartość, przy której dalsza prawidłowa praca jest niemożliwa (np. układ klimatyzacji). Nieszczelność należy do kategorii pojęć, których miara jest zawsze większa od zera. Zgodnie z definicją, nieszczelności nie można zlikwidować, można tylko ją ograniczać tak, aby osiągnięta wartość pozwalała na prawidłową pracę w określonym czasie. Metody wykrywania nieszczelności można podzielić na metody próżniowe i ciśnieniowe zależnie od tego czy ciśnienie gazu wewnątrz badanego obiektu jest niższe czy wyższe od ciśnienia atmosferycznego. Spośród wszystkich metod stosowanych do wykrywania nieszczelności w tabeli 1 zestawiono najpopularniejsze stosowane w sektorze motoryzacyjnym.

Ze względu na zdecydowaną przewagę stosowania metod ciśnieniowych (w branży automotive), podano czułość tylko dla tej odmiany. Niektóre spośród tych metod umożliwiają lokalizację nieszczelności, inne pozwalają jedynie na pomiar wypadkowego natężenia nieszczelności. Najmniejsze natężenie nieszczelności wykrywane daną metodą określa czułość tej metody (Tab. 1).

Metoda pęcherzyków powietrza jest jedną z najbardziej znanych metod ciśnieniowych. Wyróżnia się dwa warianty tej metody. W pierwszym badany obiekt jest napełniany do odpowiednio wysokiego ciśnienia i zanurza się go w wodzie i dzięki tworzącym się pęcherzykom powietrza można zlokalizować miejsce nieszczelności i je potwierdzić.

W drugim wariantcie obiekt pokrywa się cienką warstwą wodnego roztworu mydła lub detergentu i po napompowaniu obserwuje się, w których miejscach tworzą się bańki mydlane. Czułość metody z bańkami mydłanymi określa się na poziomie ok. 10^{-2} Pa · l/s, natomiast dla metody z zanurzeniem badanego obiektu w wodzie jest na poziomie około 10^{-1} Pa · l/s. W metodzie z zanurzeniem badanego obiektu duży wpływ na wiarygodność ma m.in. oświetlenie zbiornika wodnego, stopień zmętnienia wody, położenie nieszczelności i stąd czułość tej metody jest o rząd gorsza. Oba warianty opisanej metody, choć pozornie proste stwarzają często wiele niedogodności. W wypadku metody zanurzeniowej kłopoty rosną wraz z rozmiarami i wagą badanych obiektów, tym bardziej, że po badaniu muszą być dokładnie osuszone. W wypadku alternatywnego wariantu usuwanie naniesionego wcześniej roztworu jest często pracochłonne i tym samym kosztowne. W dobie coraz wyższych wymagań stawianych w branży motoryzacyjnej, również dotyczących estetyki, pozostawianie śladów po badaniu nieszczelności jest niedopuszczalne, co dodatkowo mocno ogranicza stosowanie tej metody.

Metodę powolnych zmian ciśnienia (metoda spadku ciśnienia) można obecnie uznać za najpopularniejszą spośród stosowanych do testów szczelności komponentów używanych w przemyśle

samochodowym. Jej ograniczeniem jest jednak brak możliwości lokalizacji ewentualnego wycieku. Czułość tej metody w wariacie ciśnieniowym jest określana na poziomie 10^{-2} Pa · l/s. Badany obiekt jest napompowany do ciśnienia zwykle rzędu kilku atmosfer i po odłączeniu źródła mierzy się szybkość spadku ciśnienia – $\Delta p/\Delta t$ wynikającą z występowania nieszczelności rzeczywistych. Czułość stosowanych ciśnieniomierzy wynosi zwykle ok. 100 Pa (najmniejsze rozdzielczości pomiaru dochodzą do 0,01 Pa dla najdroższych urządzeń pomiarowych). Na różnicę mierzonego spadku ciśnienia wpływa kilka czynników, takich jak:

- obecność przecieku,
- różnica objętości ΔV ,
- różnica temperatury ΔT .

Korzystając z metody spadku ciśnienia należy mieć na uwadze wpływ zmiany temperatury ΔT oraz wpływ zmiany objętości ΔV na wartości mierzonego spadku ciśnienia ΔP . Korzystając z tej metody na linii produkcyjnej należy mieć świadomość wpływu powyższych wielkości fizycznych na wynik końcowy pomiaru. Aby wyeliminować wpływ tych czynników należy zastosować metodę spadku ciśnienia w wariacie różnicowym. W metodzie tej stosuje się element wzorcowy (o akceptowalnym poziomie szczelności) wykonany z takiego samego materiału i o identycznych wymiarach jak element badany. Oba elementy są umieszczone w tych samych warunkach klimatycznych (temperatura, ciśnienie). Dzięki takiemu podejściu do pomiaru, wartości ΔT i ΔV są takie same dla elementu badanego i wzorcowego i znośzą się wzajemnie nie wnosząc udziału do pomiaru wskazywanego przez urządzenie do pomiaru szczelności. Największą wadą metody powolnych zmian ciśnienia jest długi czas pomiaru dla elementów o większych gabarytach lub wykonanych z materiałów odkształcalnych, najczęściej tworzyw sztucznych. Czasy takich pomiarów dochodzą do 60 sekund, a nawet dłużej.

Ostatnią metodą, stosunkowo popularną w branży automotive, jest metoda wykorzystująca znaczniki gazowe. Metoda ta polega na wprowadzeniu do badanego zbiornika wybranego gazu (znacznika) i śledzeniu jego upływu przez występujące nieszczelności za pomocą detektorów. Znaczniki gazowe powinny spełnić szereg wymagań: nie mogą być aktywne chemicznie czy też toksyczne, nie powinny występować (w znacznych ilościach) w atmosferze ziemskiej, nie powinny być wybuchowe/palne oraz powinny charakteryzować się możliwie dużą wartością współczynnika dyfuzji do innych gazów. Gazem spełniającym powyższe kryteria jest hel, dlatego jest on często stosowany. Niekiedy jako znaczniki gazowe używa się również wodoru (najczęściej mieszaniny do 5% wodoru z azotem, która nie jest wybuchowa) lub któregoś z freonów (obecnie już bardzo rzadko). Wodór nie spełnia części wyżej postawionych wymagań, ale jego współczynnik dyfuzji ma dużą wartość i dlatego czasami jest wybierany. Czułość tej metody dla najlepszych rozwiązań szacuje się na poziomie 10^{-5} Pa · l/s. Należy pamiętać, że ciśnieniowa metoda nie pozwala na precyzyjne oszacowanie natężenia nieszczelności. Metodę powyższą stosuje się też w znacznie uproszczonym wariacie, w którym otrzymuje się informację o lokalizacji nieszczelności, o wielkości nieszczelności wnioski można wyciągać na podstawie wartości znacznika gazowego podawanego w ppm (ang. *parts per milion*). Największą wadą metod wykorzystujących znaczniki gazowe w odmianie ciśnieniowej są trudności ze skutecznym wentylowaniem komory pomiarowej. Pomimo, że detektory gazowe pozwalają uzyskać wysoki zakres czułości to ich odtruwanie po pomiarze spowodowanym nieszczelnością lub wydostawaniem się gazu w czasie zmiany badanych elementów jest długotrwałe (typowo kilkadziesiąt sekund).

Tab. 1. Zestawienie czułości popularnych metod pomiaru nieszczelności stosowanych w sektorze motoryzacyjnym. Zakresy czułości podano tylko dla odmiany ciśnieniowej

Tab. 1. List of the sensitivity of popular leak measurement methods used in the automotive sector. Sensitivity ranges are given for the pressure variant only

Metoda	Lokalizacja	Zakres czułości metody [Pa · l/s]					
		10	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Pęcherzyków powietrza	X						
Powolnych zmian ciśnienia							
Znaczników gazowych	X						

Biorąc pod uwagę wady popularnych metod badania szczelności stosowanych w branży motoryzacyjnej opisanych powyżej, zaproponowano użycie autorskiej metody termograficznej FLT (ang. *Fast Leakage Test*) jako alternatywy do szybkich pomiarów szczelności. Zastosowanie kamer termowizyjnych do pomiaru energii cieplnej jest obecnie powszechną praktyką w wielu dziedzinach: budownictwie, automatyce, rolnictwie, medycynie, przemyśle wytwórczym, ochronie środowiska. Ostatnio również coraz częściej pojawiają się doniesienia o zastosowaniu termografii do wykrywania wycieków płynów [1, 2]. Natomiast doniesienia powiązane z wyciekami gazów z komponentów o niewielkich rozmiarach są obecnie nieliczne [3–5].

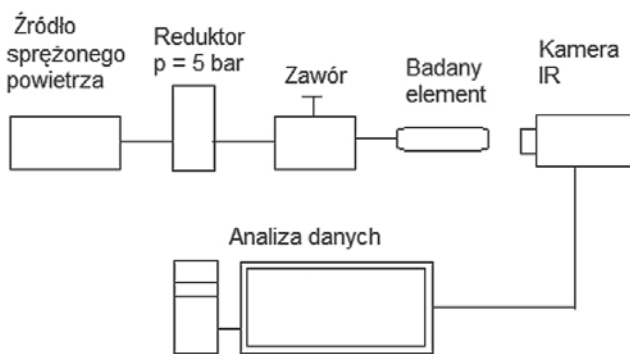
Kamery termowizyjne IR generują obrazy emisji podczerewnieni umożliwiając dokładny, bezdotkowy pomiar temperatury. W prawie wszystkich systemach sprężonego powietrza wystąpieniu awarii lub wycieku powietrza towarzyszy zmiana temperatury. Zastosowanie kamer termowizyjnych do diagnozowania takich zmian w branży motoryzacyjnej może przynieść znaczne oszczędności.

3. Opis przeprowadzonych badań eksperymentalnych

Schemat aparatury pomiarowej pokazano na Rys 1. W badaniach zastosowano kamerę termowizyjną Optris Xi 400 (częstotliwości odświeżania 10 Hz) połączoną z komputerem umożliwiającym akwizycję danych.

Ciśnienie testowe wynosiło 5 bar, czas pomiaru 3 sekundy. Sekwencja pomiaru termogramów była następująca: uruchomienie pomiaru kamerą termowizyjną, napełnienie badanej próbki sprężonym powietrzem, zrzut sprężonego powietrza, zatrzymanie pomiaru kamerą termowizyjną. Badania przeprowadzono na rzeczywistych próbkach, będących cylindrami sprężyn powietrznych stosowanych w branży motoryzacyjnej (Rys. 2).

W badaniach przeprowadzonych zgodnie z wyżej opisaną sekwencją pomiaru sprężone powietrze wydostaje się przez mikronieszczelność do otoczenia, czemu wokół nieszczelności towarzyszy efekt pochłaniania ciepła oraz efekt Joule’a-Thomsona. W praktyce okazało się, że przy małych natężeniach przepływu efektywność wyżej wymienionych zjawisk jest zbyt mała



Rys. 1. Schemat aparatury pomiarowej
Fig. 1. Diagram of the measuring apparatus



Rys. 2. Cylinder sprężyny powietrznej poddawany testowi szczelności

Fig. 2. Air spring cylinder under test leak

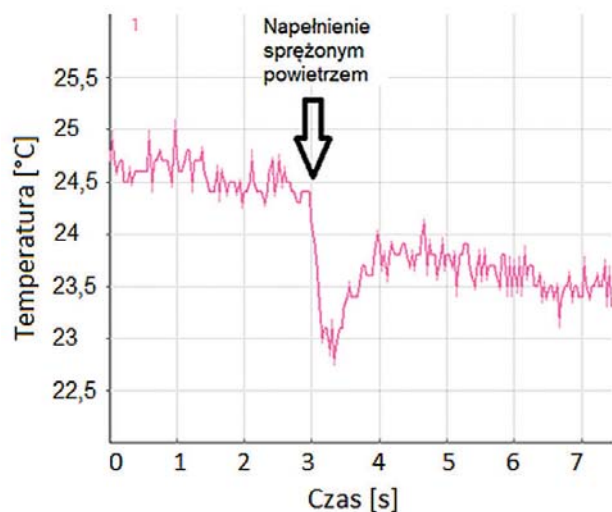
Tab. 2. Zestawie próbek użytych w badaniach – szczelność oceniono dwiema metodami

Tab. 2. Set of test samples - tightness was measured using two methods

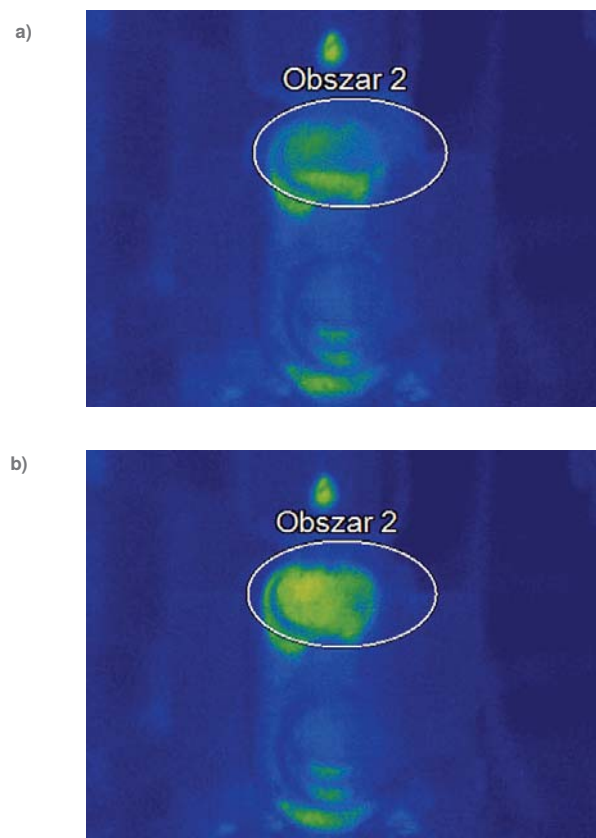
Nr próbki	Metoda gazu znakującego H ₂ [ppm]	Metoda spadku ciśnienia [Pa/s]	Typ próbki (OK – szczelna, NOK – nieszczelna)
39	0	200	OK
40	450	800	NOK
101	> 25 000	54 000	NOK
102	1600	2400	NOK
395	1200	19 400	NOK
396	> 25 000	106 000	NOK
397	> 25 000	111 200	NOK
398	> 25 000	111 200	NOK
399	> 25 000	104 000	NOK
406	0	800	OK
410	0	1000	OK
588	0	1200	OK
589	0	1200	OK
590	0	1000	OK
591	0	800	OK
592	0	400	OK
593	0	800	OK
594	0	800	OK
596	0	800	OK
597	0	1000	OK
598	> 25 000	104 800	NOK
599	11 000	57 600	NOK
600	20 000	91 000	NOK
601	> 25 000	101 400	NOK
602	> 25 000	100 800	NOK
603	> 25 000	101 000	NOK
604	> 25 000	101 000	NOK
605	> 25 000	124 400	NOK
608	0	1000	OK
609	0	1400	OK

w celu różnicowania próbek NOK/OK. Aby wzmocnić ten efekt opracowano autorską metodą, w której próbki są dodatkowo pokrywane dedykowanym roztworem, co umożliwia zwiększenie czułości badanej metody z zastosowaniem kamer IR i obserwację mniejszych nieszczelności [6]. Maksymalna czułość, jaką uzyskano w warunkach laboratoryjnych wyniosła $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{l/s}$. Przykładowy przebieg temperatury pokazano na Rys. 3, a sekwencję obrazów termowizyjnych na Rys. 4.

Warto zwrócić szczególną uwagę na fakt, że odpowiedź w przypadku nieszczelności uzyskuje się niemalże natychmiast po podaniu sprężonego powietrza (rys. 3). Do testów użyto 14 cylindrów szczelnych (OK) oraz 16 cylindrów nieszczelnych (NOK). W Tabeli 2 zestawiono wyniki testów szczelności



Rys. 3. Przykładowy przebieg temperatury dla próbki NOK
Fig. 3. Measured temperature changes during the leak test



Rys. 4. Przykładowe dwa obrazy z sekwencji dla próbki NOK a) przed napełnieniem oraz b) po napełnieniu sprężonym powietrzem
Fig. 4. Examples of two images from the sequence for the NOK sample a) before inflation and b) after filling with compressed air

metodami alternatywnymi – gazu znakującego H_2 oraz metodą spadku ciśnienia w celu rozróżnienia próbek OK i NOK.

4. Algorytmy klasyfikacji nieszczelności na podstawie sekwencji obrazów termowizyjnych

Klasyfikacja nieszczelności danego elementu może być rozpatrywana jako problem klasyfikacji binarnej. Oznacza to, że na podstawie zbioru N obrazów termowizyjnych $I = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}$ o wysokości H oraz szerokości W zarejestrowanych przez kamerę z określoną częstotliwością, zadaniem jest przypisanie elementowi jednej z dwóch etykiet $\hat{y} \in \{0, 1\}$, oznaczające odpowiednio wyciek lub brak wycieku. Innymi słowy, poszukiwana jest funkcja $f(x)$, która dla sekwencji obrazów termowizyjnych I reprezentowanych przez wektor cech x , umożliwi przypisanie prawidłowej klasy:

$$\hat{y} = f(x) = \begin{cases} 0, & y = 0 \\ 1, & y = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Ze względu na to, że algorytmy, które zostały użyte w badaniu przyjmują wektor cech opisujący sekwencję termogramów, należało zaproponować funkcję $g(I)$ wyznaczającą cechy na podstawie całej sekwencji, tj. bazującą na wszystkich, pełnych, zarejestrowanych obrazach.

Sekwencja obrazów termowizyjnych dostarcza informacji o przebiegu temperatury w czasie dla każdego piksela rejestrowanego obrazu. Na jej podstawie, należy wyodrębnić informacje o zmianach temperatury i ich charakterze. Dlatego zaproponowano taki zbiór cech, w którym przeprowadzana jest najpierw operacja obliczenia podstawowych miar określających zmiany temperatury w czasie dla każdego piksela sekwencji, a następnie przeprowadzane są obliczenia wyznaczające wektor cech na podstawie informacji przestrzennych. Rysunek 5 przedstawia opisany proces. Wzory (2)–(5) opisują redukcję w czasie przez obliczenie średniej \bar{I} , kwadratu odchylenia standardowego I_{σ^2} , różnicę między maksymalną oraz minimalną zarejestrowaną temperaturą I_{ptp} oraz medianę odchylenia standardowego I_{MAD} dla każdego piksela sekwencji po czasie, uzyskując wielokanałowy obraz. Następnie tworzona jest macierz X (6), w której dla każdego kanału wyznacza się wartość minimalną oraz maksymalną, medianę, średnią oraz wariancję. Na podstawie macierzy X wyznacza się wektor cech x , gdzie zapis $X_{i,*}$ oznacza i -ty wiersz macierzy X , tak jak przedstawia to równanie (7).

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n \quad (2)$$

$$I_{\sigma^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_n - \bar{I})^2 \quad (3)$$

$$I_{ptp} = \{ \max I_{i,j} - \min I_{i,j} : i \in \{1, 2, \dots, H\}, j \in \{1, 2, \dots, W\} \}, \quad (4)$$

$$I_{MAD} = \{ \text{median}(I_{i,j} - \text{median}(I_{i,j})) : i \in \{1, 2, \dots, H\}, j \in \{1, 2, \dots, W\} \} \quad (5)$$

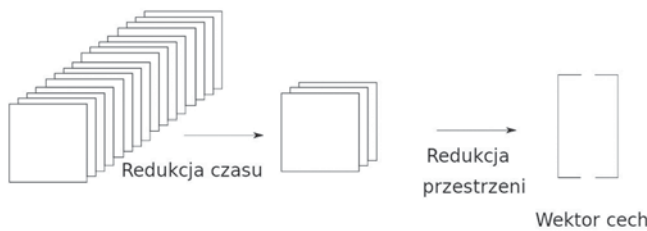
$$X = \begin{bmatrix} \min I_{\sigma^2} & \min I_{ptp} & \min I_{MAD} \\ \max I_{\sigma^2} & \max I_{ptp} & \max I_{MAD} \\ \text{median} I_{\sigma^2} & \text{median} I_{ptp} & \text{median} I_{MAD} \\ \bar{I}_{\sigma^2} & \bar{I}_{ptp} & \bar{I}_{MAD} \\ \text{Var}(I_{\sigma^2}) & \text{Var}(I_{ptp}) & \text{Var}(I_{MAD}) \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$x = g(I) = [X_{1,*} \quad X_{2,*} \quad \dots \quad X_{5,*}] \quad (7)$$

W badaniu użyto pięciu różnych algorytmów sztucznej inteligencji, które na wejściu przyjmują opisany wcześniej wektor cech x :

- **AdaBoost** – meta algorytm wykorzystujący wiele słabych klasyfikatorów [7],
- **Liniowy/RBF SVM** – rodzina algorytmów opartych na maszynie wektorów nośnych z różną funkcją jądra [8],
- **Naiwny Bayes** – klasyfikator wykorzystujący twierdzenie Bayesa,
- **MLP** – sztuczna sieć neuronowa złożona z warstwy wejściowej, wyjściowej oraz warstw ukrytych.

Wszystkie wymienione algorytmy zostały zaimplementowane w bibliotece *scikit-learn* [9], którą wykorzystano w badaniu. Warto zaznaczyć, że sama metoda rozpoczyna się od wstępnego przygotowania sekwencji, na podstawie której są liczone cechy. Takim krokiem jest uruchomienie filtra medianowego, który pozwala na wygładzenie przebiegu temperatury.



Rys. 5. Wizualizacja etapów obliczenia cech na podstawie sekwencji obrazów termowizyjnych
Fig. 5. Visualization of the stages of calculating the features based on the sequence of thermal images

5. Opis eksperymentu klasyfikacji oraz wyniki

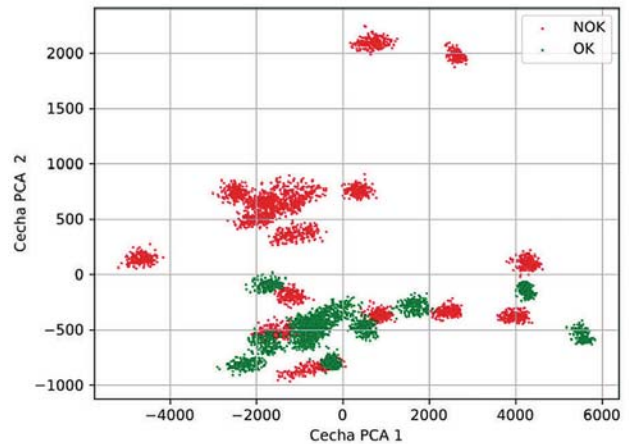
Ze względu na małą licznosc bazowego zbioru z nagrany mi sekwencjami próbek, użyto techniki sztucznego generowania obrazów (ang. *data augmentation*) w celu powiększenia zbioru danych użytego w procesie uczenia. Dla każdej oryginalnej sekwencji wygenerowano 200 nowych, w których przeprowadzono następujące operacje: nałożenie szumu gaussowskiego o średniej $\mu = 0$ °C oraz odchyleniu standardowym $\sigma = 0,4$ °C, rotacja kamery o kąt w przedziale $[-10^\circ; 10^\circ]$, przesunięcie obrazu góra/dół oraz prawo/lewo w przedziale $[-10$ px; 10 px]. Dzięki takiemu zabiegowi uzyskano zbiór 6000 sekwencji, który został podzielony na zbiór treningowy oraz testowy w proporcji 6:4. Na Rys. 6 przedstawiono wykres punktowy prezentujący, jak rozkładają się próbki OK/NOK w zależności od dwóch najbardziej znaczących cech uzyskanych za pomocą transformacji algorytmem PCA.

Badania związane z klasyfikacją były podzielone na dwa etapy. Zbiór treningowy, na podstawie którego były uczone wszystkie algorytmy, składał się z 3600 sekwencji, zaś zbiór testowy liczył 2400 przebiegów. Dla zbioru treningowego policzono cechy oraz uruchomiono algorytm PCA. Tak przygotowany zbiór cech został przekazany do każdego algorytmu, aby przeprowadzić proces uczenia.

Wyczone algorytmy poddano testom na dedykowanym zbiorze testowym. Dla każdego algorytmu wyznaczono cztery miary oceny efektywności klasyfikatorów, tj. skuteczność, precyzja, swoistość oraz F1 [10]. Zmierzono również czasy trwania działania algorytmów dla pojedynczej próbki. Uzyskane wyniki jakości klasyfikacji przedstawiono w Tab. 3. Na jej podstawie można wyciągnąć wniosek, że z zadaniem najlepiej poradził sobie algorytm *AdaBoost* uzyskując skuteczność na poziomie 92,75 %. Jakość klasyfikacji *RBF SVM* przedstawia się równie dobrze,

jednak precyzja jest gorsza aż o 5 punktów procentowych niż w przypadku pierwszego. Najlepszy wynik biorąc pod uwagę swoistość uzyskał *RBF SVM*. Tabela 4 przedstawia macierz błędów dla najlepszego algorytmu. Na jej podstawie można stwierdzić, że *AdaBoost* częściej popełnia błędy klasyfikując nieszczęlną próbkę jako szczęlną. Dotyczy to 9,55 % wszystkich nieszczęlnych próbek. Natomiast odwrotne błędy, tj. klasyfikacja szczęlnego elementu jako nieszczęlnego zdarzyła się w przypadku 4,18 % elementów szczęlnych.

Czasy działania algorytmów na komputerze z procesorem Intel Core i7 77000 z 16 GB RAM są bardzo krótkie i w najgorszym przypadku wynoszą kilka mikrosekund, przez co w żaden sposób nie wpłyną znacząco na długość trwania samego testu szczelności. Średnie czasy działania zebrano w Tab. 5.



Rys. 6. Wizualizacja całego zbioru danych, na podstawie którego przeprowadzono testy
Fig. 6. Visualization of the entire data set on the basis of which the tests were carried out

Tab. 3. Podsumowanie wyników klasyfikacji na zbiorze testowym. Najlepsze wyniki zostały podkreślone

Tab. 3. Summary of the classification results on the test set. The best results are underlined

Algorytm	Skuteczność [%]	Precyzja [%]	Swoistość [%]	F1 [%]
AdaBoost	<u>92,75</u>	<u>88,26</u>	95,82	<u>91,88</u>
Liniowy SVM	77,04	67,02	91,34	77,32
MLP	76,21	69,65	78,79	73,94
Naiwny Bayes	76,25	66,74	88,81	76,21
RBF SVM	91,29	83,82	<u>98,74</u>	90,67

Tab. 4. Macierz błędów dla klasyfikatora AdaBoost
Tab. 4. The matrix of errors for Adaboost classifier

		Klasa predykowana	
		Szczelny	Nieszczelny
Klasa rzeczywista	Nieszczelny	90,45 %	9,55 %
	Szczelny	4,18 %	95,82 %

Tab. 5. Czas działania algorytmów klasyfikacji dla jednej próbki. Najkrótszy czas został podkreślony
 Tab. 5. Operation time of classification algorithms for one sample. The shortest time is underlined

	Algorytm				
	AdaBoost	Liniowy SVM	Naiwny Bayes	RBF SVM	Sieć neuronowa MLP
Średni czas [us]	7,53	10,41	<u>0,13</u>	17,71	0,74

6. Podsumowanie

Ideą opisanego rozwiązania jest wykorzystanie do detekcji nieszczelności metody opartej na termowizji. Termografia jako metoda diagnostyczna wykorzystująca zaawansowane narzędzia optyczne do pomiaru promieniowania podczerwonego, umożliwia zobrazowanie rozkładu temperatury na powierzchni badanego elementu. Właściwa interpretacja uzyskanych informacji pozwala na zidentyfikowanie anomalii temperaturowych będących efektem nieprawidłowego funkcjonowania danego elementu, czy też, tak jak w naszym przypadku, jego nieszczelności. Zastąpienie obecnych metod detekcji nieszczelności proponowaną przez nas metodą termowizyjną pozwoli na skrócenie czasu niezbędnego dla potwierdzenia szczelności/nieszczelności (kluczowy parametr w kontekście optymalizacji kosztów procesu produkcyjnego). Co więcej, badana metoda termowizyjna pozwala na lokalizację miejsca nieszczelności (funkcja nieoczywista w przypadku innych rozwiązań, a kluczowa z punktu widzenia identyfikacji błędów w procesie produkcyjnym stojącego za nieszczelnością). Mimo oczywistych ograniczeń proponowanej metody (badane miejsce musi znajdować się w polu widzenia kamery, brak możliwości pomiaru ilościowego), proponowana metoda badania szczelności komponentów stanowi ciekawą alternatywę dla testów szczelności w sektorze motoryzacyjnym.

Podziękowania

Opisane badania zostały wykonane w ramach projektu „Opracowanie i weryfikacja w warunkach rzeczywistych innowacyjnego detektora nieszczelności opartego o metodę termografii, dedykowanego w szczególności branży automotive” nr POIR.01.01.01-00-0773/17 współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Praca powstała przy współudziale Wrocławskiego Centrum Akademickiego, realizującego program MOZART (Miejski Program Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej).

Bibliografia

1. Brodetsky E., Savic M., *Leak monitoring system for gas pipelines*, [In:] Proceedings of IEEE International Conference Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 3, 1993, 17–20, DOI: 10.1109/ICASSP.1993.319424.
2. Weil G.J., *Non contact, remote sensing of buried water pipeline leaks using infrared thermography*, [In:] Proceedings of Water Resources Planning and Management and Urban, Water Resources, Vol. 1993, 404–407, 1993.
3. Kroll A., Baetz W., Peretzki D., *On autonomous detection of pressured air and gas leaks using passive IR-thermography for mobile robot application*, [In:] Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 291–296, 2009, DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152337.
4. Lewis A.W., Yuen S.T.S., Smith A.J.R., *Detection of gas leakage from landfills using infrared thermography – applicability and limitations*, “Waste Management & Research”, Vol. 21, No. 5, 2003, 436–447, DOI: 10.1177/0734242X0302100506.
5. Qin H., Wang T., Fan W., *Air Leak Localization Method Based on Infrared Thermography Using Local Gray-Entropy Difference Algorithm*. “Applied Mechanics and Materials”, Vol. 233, 2012, 200–203, DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.233.200.
6. Zgłoszenie patentowe nr P434369.
7. Schapire R.E., *Explaining adaboost. Empirical inference*. 37–52, 2013.
8. Cortes C., Vapnik V., *Support-vector networks*. “Machine learning”, Vol. 20(3), 1995, 273–297, DOI: 10.1007/BF00994018.
9. Pedregosa F. et al., *Scikit-learn: Machine Learning in Python*, “Journal of Machine Learning Research”, Vol. 12, 2825–2830, 2011.
10. Powers D., *Evaluation: From Precision, Recall and F-Factor to ROC, Informedness, Markedness & Correlation*, 2008.

The Use of Thermovision for Leak Detection in the Automotive Sector

Abstract: Increasing requirements for environmental protection, safety or reliability force automotive industries to use more efficient tests to measure tightness of the components. Currently adapted methods brings limitations which makes automotive industry open for new techniques for leakage tests. Infrared cameras are widely used in various fields. Using them to test leakage of closed-volume systems allows to significantly reduce test time, especially for objects which requires long stabilization times in competitive methods. In the article thermovision usage for leakage detection of gas springs were described.

Keywords: leakage detection, leakage localization, thermovision, leakage classification algorithm

dr inż. Wojciech Macherzyński

wojciech.macherzynski@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0002-8044-0043

Absolwent Wydziału Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. W 2011 r. uzyskał z wyróżnieniem tytuł doktora nauk technicznych. Za swoją pracę doktorską został nagrodzony w Konkursie o Nagrodę ABB, a skonstruowane na potrzeby badań urządzenie technologiczne spotkało się z uznaniem Kapietuły Naczelnej Organizacji Technicznej, za co został dwukrotnie nagrodzony. Jego praca badawcza jest powiązana z technologią wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych oraz ich zastosowaniem w aplikacjach medycznych oraz przemysłowych. Współpracę z firmą Unitem sp. z o.o. rozpoczął będąc laureatem wrocławskiego programu MOZART (Miejski Program Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej).



mgr inż. Marcin Ochman

marcin.ochman@unitem.pl
ORCID: 0000-0002-8075-0033

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W 2016 r. uzyskał tytuł inżyniera, w 2017 r. tytuł magistra inżyniera, obydwa z wyróżnieniem. Rozpoczął studia doktorskie na tym samym wydziale w 2018 r. Jego głównymi zainteresowaniami są algorytmy przetwarzania obrazów oraz techniki SLAM. W firmie Unitem od 2018 r., gdzie uczestniczył w dwóch projektach współfinansowanych przez NCBiR dotyczących wykrywania nieszczelności elementów na podstawie kamer termowizyjnych oraz zbudowania przemysłowej kosiarki autonomicznej.



dr inż. Zbigniew Kulas

zbigniew.kulas@unitem.pl
ORCID: 0000-0001-9154-7981

Adiunkt z ponad 10-letnim stażem w działach R&D w firmach takich, jak Nokia, Dialog. Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Autor i współautor szeregu publikacji w tym z zakresu zastosowania uczenia maszynowego i metod statystycznych do analizy i klasyfikacji obrazów cyfrowych. Swoje zainteresowania naukowe rozwijał m.in. w czasie stażu badawczego w Hiszpanii, gdzie opracował sieć wykorzystaną do estymacji objętości upraw. Współautor trzech patentów.



dr inż. Krzysztof Dudek

krzysztof.dudek@pwr.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9442-989X

Emerytowany adiunkt Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. Specjalista z zakresu diagnostyki i niezawodności maszyn, w tym pomiarów odkształceń metodą tensometrii oporowej, badań wibroakustycznych i termowizyjnych. Autor ponad 300 artykułów naukowych dotyczących diagnostyki technicznej i medycznej oraz analiz statystycznych wyników badań.



mgr inż. Mateusz Didyk

mateusz.didyk@unitem.pl
ORCID: 0000-0002-4074-2979

Manager projektów z solidnym fundamentem wiedzy inżynierskiej. Absolwent Wydziału Elektroniki na Politechnice Wrocławskiej. Jeden z prekursorów budowy dostępowej sieci światłowodowej oraz telewizji IP we Wrocławiu. Przez ostatnie lata zaangażowany w duże projekty branży ICT. W firmie Unitem od 2018 r., gdzie uczestniczy w badaniach współfinansowanych przez NCBiR związanych z zastosowaniem termowizji do wykrywania nieszczelności elementów.



mgr inż. Dawid Sroczyński

dawid.sroczynski@unitem.pl
ORCID: 0000-0002-5141-5332

Wizjoner i manager. Absolwent Politechniki Wrocławskiej. Od 15 lat zaangażowany w tworzenie firm automatyzujących procesy produkcyjne, budowę robotów oraz innowacyjne rozwiązania w automatyce przemysłowej. Pomysłodawca innowacyjnego testera szczelności opartego na analizie obrazów termowizyjnych.

