



Diagnostyka techniczna obiektów z wykorzystaniem aktywnego obrazowania

MAREK PISZCZEK

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, mpiszczek@wat.edu.pl

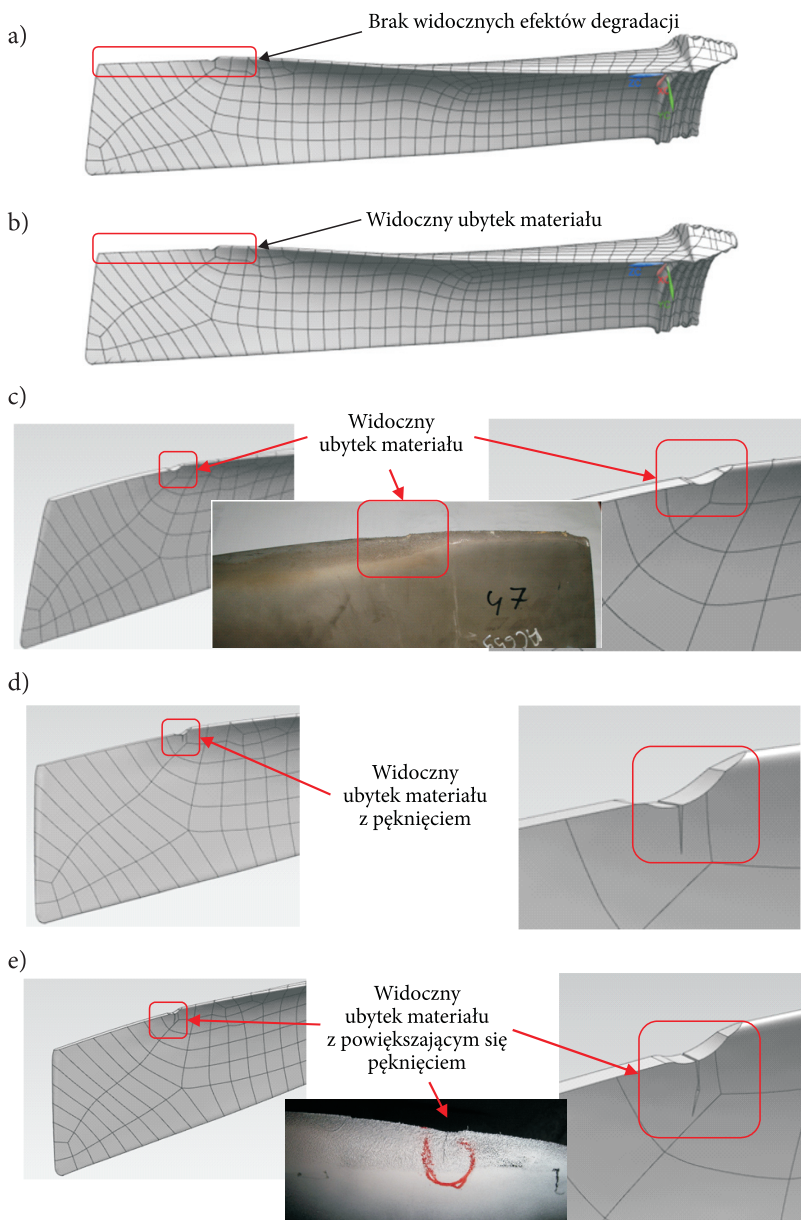
Streszczenie. Pomiary diagnostyczne trudno mierzalnych parametrów wymagają użycia niestandardowych technik pomiarowych. Jedną z takich technik jest tzw. aktywne obrazowanie metodą kadrowania przestrzenno-czasowego. Unikalną własnością tej metody jest możliwość rejestracji obrazu dla zdefiniowanego zakresu czasu i przestrzeni. W artykule scharakteryzowano metodę oraz zaprezentowano eksperymentalne urządzenie stanowiące implementację tej metody. Możliwe użycie opisanej techniki rejestracji obrazu zaprezentowano na przykładzie diagnostyki uszkodzeń łopatek turbiny parowej. W opracowaniu zawarto również wstępne wyniki z testów laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: aktywne obrazowanie, cyfrowe przetwarzanie obrazów, diagnostyka

DOI: 10.5604/12345865.1186227

1. Wprowadzenie

Problem diagnostyki obiektów technicznych to bardzo ważne zagadnienie szczególnie w obszarze kluczowych obszarów gospodarki narodowej. Energetyka niewątpliwie jest takim obszarem. Zdajemy sobie sprawę z rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną w naszym kraju i jednocześnie ograniczonego zakresu dywersyfikacji dostaw tego medium. W związku z powyższym musimy być również świadomi skutków, jakie mogą wywołać nieprzewidziane awarie i ograniczenia w zakresie dostaw energii elektrycznej. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom i potrzebom instytucji odpowiedzialnych za zabezpieczenie techniczne obiektów dostarczających energię elektryczną, pojawił się pomysł opracowania innowacyjnej metody diagnostycznej do tego typu zastosowań. Polega on na diagnostyce turbin parowych podczas ich normalnej pracy.



Rys. 1. Graficzne przedstawienie etapów degradacji łopatk

Diagnostyka techniczna obiektów stanowi ważny element ustalania zdolności różnych urządzeń lub ich części do działania. W procesie diagnostycznym wykorzystywane mogą być różne technologie i metody akwizycji danych. Niejednokrotnie do diagnostyki wykorzystuje się zaawansowane techniki wizyjne. Systemy rejestracji

obrazów to przecież nie tylko urządzenia obserwacyjne, lecz także pomiarowe — stąd propozycja ich zastosowania.

Podstawowym procesem charakteryzującym postępujący proces uszkodzenia łopatki jest mechaniczne uszkodzenie jej powierzchni [1-4]. Ogólny schemat procesu degradacji przebiega w następujący sposób:

- a) w nowej łopatce, względnie krótko użytkowanej, nie występują obserwowane wizualnie procesy degradacyjne (rys. 1a),
- b) w wyniku normalnego działania turbiny na łopatkę oddziałują m.in. czynniki powodujące jej stopniową erozję (rys. 1b),
- c) długotrwałe działanie czynnika erodującego powoduje, że na granicy obszarów utwardzonego/nieutwardzonego proces degradacji postępuje szybciej, powodując powstanie lokalnie większego ubytku materiału (rys. 1c),
- d) pogłębiający się proces ubytku materiału na granicy obszarów utwardzonego i nieutwardzonego w efekcie doprowadza do powstania pęknięcia (rys. 1d),
- e) pęknięcie z czasem powiększa się i w efekcie może doprowadzić do odewania się kawałka łopatki (rys. 1e).

Dokładna skala czasowa scharakteryzowanego powyżej procesu nie jest dokładnie znana, zależy od sposobu wykonania łopatki i z pewnością jest rzeczą indywidualną dla każdej z łopatek. Jednak orientacyjnie szacuje się, że jest to proces trwający kilka lat.

Powyższy opis procesu degradacji obiektu wskazuje na możliwość użycia do diagnostyki systemu wizyjnego, a fakt występowania czynnika rozpraszającego (podczas normalnej pracy turbiny) sugeruje możliwość zastosowania tzw. metody kadrowania przestrzenno-czasowego — rozwiązania opracowanego i rozwijanego w Instytucie Optoelektroniki WAT [5, 6].

2. Kadrowanie przestrzenno-czasowe

Podstawowym celem stosowania technik wizyjnych w systemach informacyjno-pomiarowych jest uzyskanie obrazu, czyli uchwycenie w kadrze pewnej chwili z obserwowanej rzeczywistości. Rzadko kiedy zastanawiamy się jednak nad aspektami czasowymi i przestrzennymi obrazowania. Rejestracja obrazu kamerą stanowi wypadkową czasu rejestracji obrazu na sensorze (czas migawki — *shutter*) oraz czasu oświetlenia obiektu.

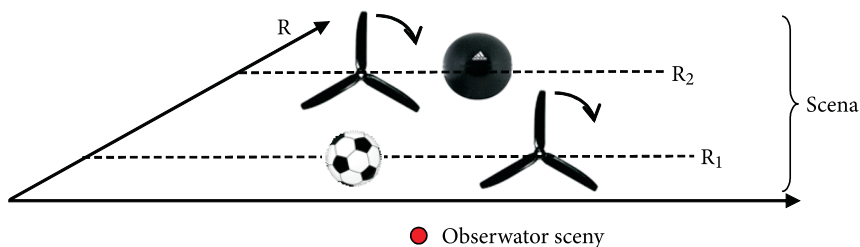
W klasycznym przypadku czasy migawki kamery i oświetlenia obiektu są na tyle długie, że nie jesteśmy w stanie zaobserwować szeregu ciekawych zjawisk. Oko ludzkie czy standardowe kamery dedykowane do monitoringu (CCTV) są w stanie zarejestrować obiekty i zjawiska charakteryzujące się stosunkowo małą dynamiką.

Uchwycona w kadrze scena stanowi rzut trójwymiarowej przestrzeni na dwuwymiarową powierzchnię. W zarejestrowanym kadrze znajdą się obiekty występujące na różnych odległościach od obserwatora. W takim przypadku mówimy o szerokim horyzoncie czasowym i przestrzennym rejestrowanych zdarzeń.

W celu rejestracji dynamicznych zjawisk parametry pracy systemu rejestrującego obraz muszą ulec zmianie. Akwizycję szybkich procesów można uzyskać w dwojaki sposób. Pierwszym rozwiązaniem jest skrócenie czasu oświetlenia obiektu przy zachowaniu stosunkowo długiej migawki. Bazuje na tym np. technika stroboskopowa. Dzięki takiemu rozwiązaniu nawet system wzrokowy człowieka (charakteryzujący się długą akwizycją promieniowania) jest w stanie „zarejestrować” obraz szybko przemieszczającego się obiektu, np. łopatki śmigła. Drugie z rozwiązań polega na skróceniu czasu akwizycji obrazu przy zachowaniu stosunkowo długiego czasu oświetlenia. W ten sposób działają np. szybkie kamery rejestrujące poklatkowo dynamicznie przebiegający proces, np. podczas crash testów. W każdym z ww. rozwiązań zawężony zostaje horyzont czasowy rejestrowanych zdarzeń bez wpływu na parametry horyzontu przestrzennego.

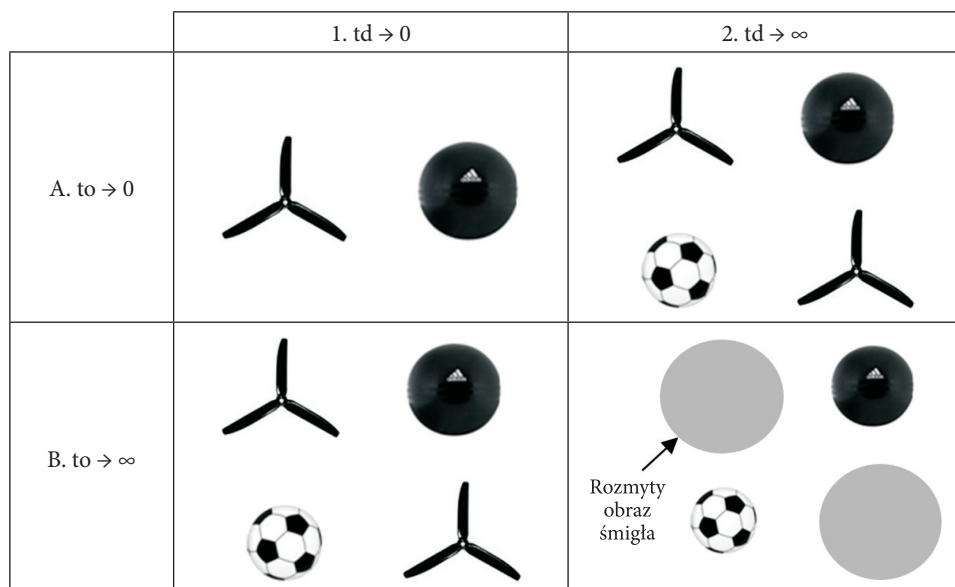
Najbardziej zaawansowanym przypadkiem rejestracji obrazu jest kadrowanie przestrzenno-czasowe. W rozwiązaniu tym dzięki jednoczesnemu skróceniu czasu akwizycji obrazu i czasu oświetlenia obiektu dochodzi do zawężenia horyzontu czasowego i przestrzennego tego, co zostanie zarejestrowane w kadrze. Przy czym zawężenie przestrzeni obserwacji należy rozumieć jako selekcję odległości do obserwowanych obiektów czy zjawisk oraz głębokości tej sceny.

Jeśli przyjąć pewną modelową scenę przedstawioną na rysunku 2, to widzimy, że występują w niej zarówno obiekty statyczne (piłki), jak i dynamiczne (wiatraki). Dodatkowo obiekty te zlokalizowane są na różnych odległościach od obserwatora R_1 i R_2 .



Rys. 2. Model sceny

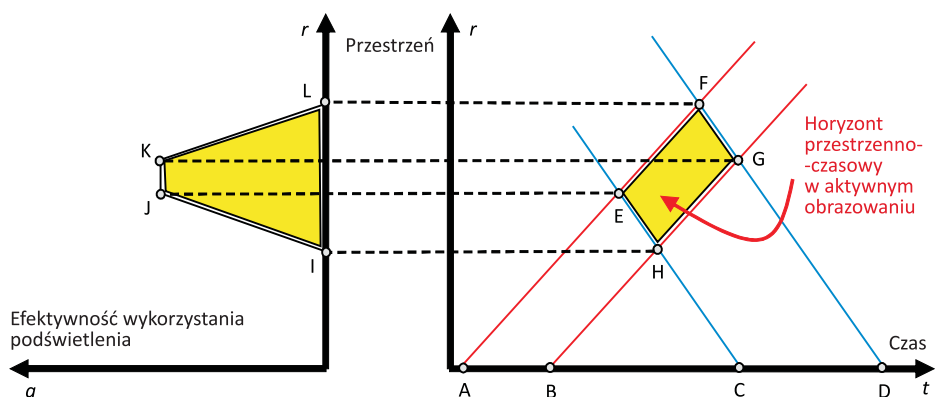
W zależności od parametrów akwizycji obrazu, z punktu widzenia obserwatora scena ta będzie wyglądać w odmienny sposób. Na rysunku 3 przedstawiono schematycznie kadry dla czterech przypadków uwzględniających krótko- i długoczasową detekcję oraz krótko- i długoczasowe oświetlenie.



Rys. 3. Zarejestrowane kadry w funkcji różnych czasów oświetlenia i detekcji

Przedmiotem szczególnego zainteresowania tego artykułu jest przypadek A1, czyli krótkoczasowego oświetlenia i detekcji. Aby wyjaśnić szczególne własności tego typu rejestracji obrazu, posłużymy się tzw. diagramem przestrzenno-czasowym (rys. 4), gdzie na jednej osi mamy wielkości czasowe, a na drugiej odpowiadające im wielkości przestrzenne (trójwymiarowa przestrzeń została zredukowana do jednego wymiaru będącego funkcją odległości obiektu od obserwatora).

Na diagramie możemy zidentyfikować wszystkie kluczowe własności opisywanej metody obrazowania. I tak np. na osi czasu t odcinki AB i CD oznaczają odpowiednio czas trwania oświetlenia obiektu i czas trwania detekcji obrazu. Umieszczenie ich w pozycji $r = 0$ oznacza, że oświetlacz i odbiornik znajdują się w jednakowej odległości od obiektu i jednocześnie miejsce to oznacza pozycję obserwatora. Czasy trwania oświetlenia i detekcji oraz odstęp czasowy między nimi determinuje horyzont przestrzenno-czasowy aktywnego obrazowania — a więc fragment przestrzeni i czasu zarejestrowany w kadrze. Widać na tym przykładzie, że za pomocą odpowiednio dobranych parametrów czasowych akwizycji obrazu można swobodnie przemieszczać się po diagramie, czyli wpływać na to, co zostanie zarejestrowane na obrazie. Oczywiście nie każdy fragment przestrzeni i czasu wewnątrz horyzontu zostanie zarejestrowany z tą samą „intensywnością”, gdyż decyduje o tym tzw. efektywność wykorzystania podświetlenia. Maksymalną intensywność uzyskujemy w części kadru EG odpowiadającej wartościom pośrednim między minimalną a maksymalną odległością obrazowania — odpowiednio punkty H i F.



Rys. 4. Diagram przestrzenno-czasowy

Bazując na diagramie przestrzenno-czasowym, w zależności od potrzeb możemy projektować eksperyment pomiarowy w zakresie takich parametrów jak:

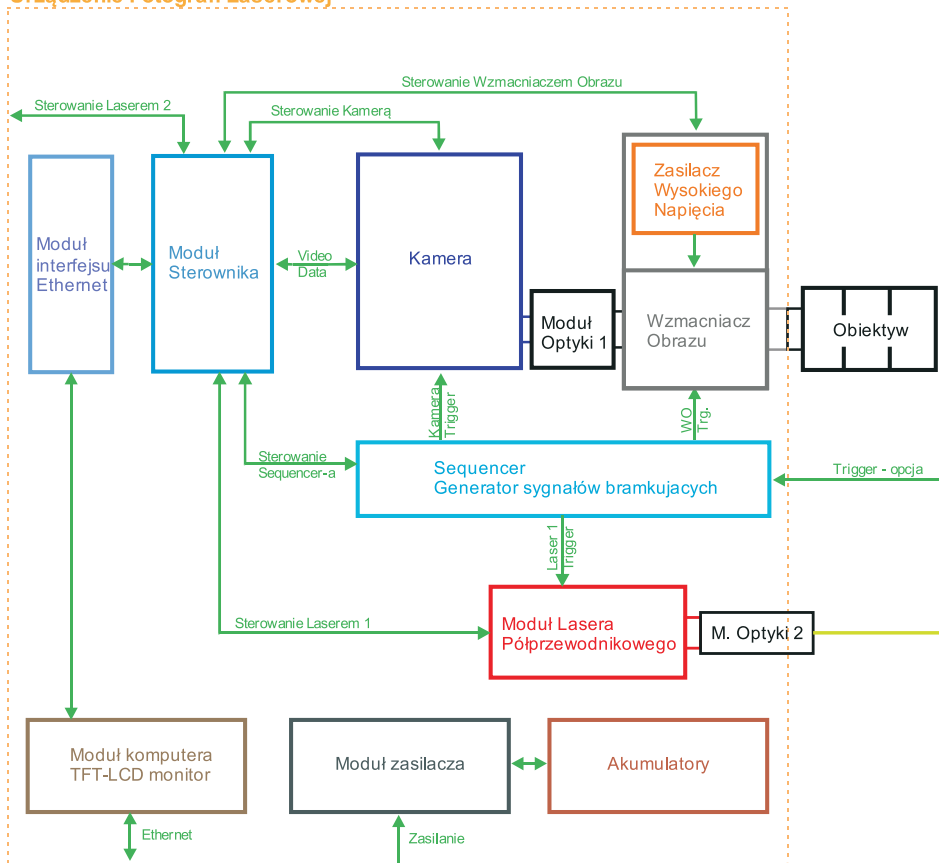
- początek w czasie rejestrowanych zdarzeń $T_{START} = E(t)$,
- przedział czasowy rejestrowanych zdarzeń $\Delta T = G(t) - E(t)$,
- minimalna odległość do obserwowanej sceny $R_{START} = H(r)$,
- głębokość obserwowanej sceny $\Delta R = F(r) - H(r)$.

3. Urządzenie fotografii laserowej

Dzięki współpracy z firmą HARDsoft z Krakowa udało się wykonać implementację sprzętową metody kadrowania przestrzenno-czasowego. Powstała w ten sposób eksperymentalna konstrukcja, która została nazwana Urządzeniem Fotografii Laserowej (UFL). Na poniższych rysunkach (5 i 6) przedstawiono schemat blokowy urządzenia oraz jego fizyczną realizację.

Urządzenie zostało pomyślane jako konstrukcja ewaluacyjna z możliwością jego użycia w różnego typu eksperymentach pomiarowych. W związku z tym wyposażono je w możliwość współpracy z różnymi laserami, obiektywami oraz złożonymi sposobami wyzwalania i synchronizacji do pomiarów. Urządzenie jest w stanie emulować wszystkie warunki pracy przedstawione na rysunku 3, jednak w głównej mierze przeznaczone jest do pracy w trybie A1, czyli kadrowania przestrzenno-czasowego. Jego charakterystyczne parametry to m.in.: rozdzielczość obrazu — $1360(H) \times 1024(V)$ pikseli, głębia bitowa 14 bitów, zakres spektralny sensora 400-900 nm, oświetlacz laserowy — dowolny z możliwością synchronizacji z sequencerem UFL, rozdzielczość czasowa sequencera — 1 ns, jitter $< 0,5$ ns, minimalna głębokość obserwacji — 0,75 m, minimalny przyrost odległości — 0,15 m, minimalny przyrost głębokości — 0,15 m.

Urządzenie Fotografii Laserowej



Rys. 5. Schemat blokowy UFL



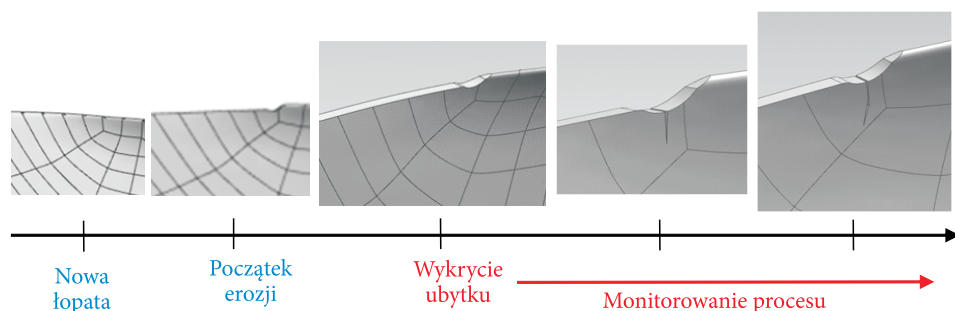
Rys. 6. Urządzenie fotografii laserowej

4. Adaptacja metody do problemu diagnostycznego

Spośród różnych możliwych zastosowań metody aktywnego obrazowania szczególnie interesujący widać się przypadek, gdzie wszystkie własności metody są istotne z punktu widzenia rejestracji obrazu. Taki przypadek może dotyczyć

właśnie diagnostyki łopatek turbiny parowej. Obiektem pomiarowym są łopatki turbiny stopnia NP, a dokładniej pojawiające się mechaniczne uszkodzenia na jej powierzchni wynikające ze stopniowego zużycia.

Z diagnostycznego punktu widzenia zasadne byłoby uchwycenie momentu pojawienia się powiększonego ubytku materiału na granicy obszarów utwardzony/nieutwardzony, a następnie monitorowanie tego procesu w „stosownych” interwałach czasowych.



Rys. 7. Charakterystyka czasowa procesu degradacji łopatki wraz z proponowanym sposobem jego diagnostyki

Przedstawiony powyżej mechanizm stopniowego uszkodzenia łopatki turbiny wymaga monitorowania procesu erozyjnego. Można to zrobić w momencie okresowych zatrzymań turbiny, można również spróbować wykonać rejestrację obrazów dla celów diagnostycznych podczas normalnej pracy bloku energetycznego. Prowadzone badania w ramach projektu POIG 1.4 *Innowacyjne laserowe metody diagnostyki oraz technologie naprawy łopatek turbin parowych* mają na celu zweryfikowanie takiej możliwości.

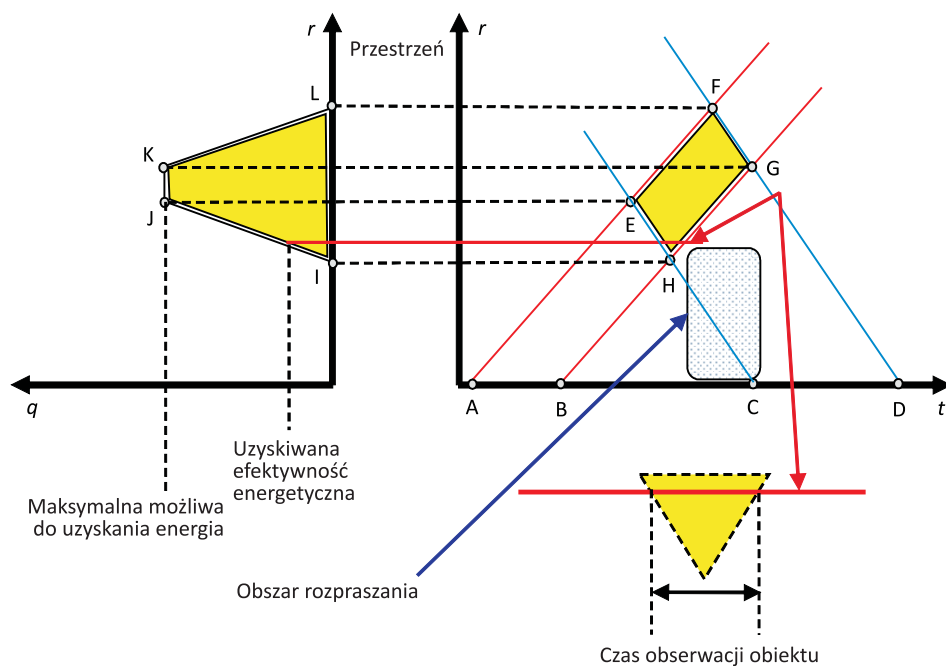
Jednak rejestracja obrazu bez zatrzymywania turbiny rodzi pewne problemy. Pierwszym z nich jest szybkość obracających się łopatek. Drugi dotyczy występowania czynnika rozpraszającego (pary wodnej), który uniemożliwia bezpośrednią obserwację.

Zastosowanie metody kadrowania przestrzenno-czasowego umożliwi zrealizowanie obserwacji procesu.

W rozpatrywanej metodzie diagnostycznej wiemy, że obiekt badań znajduje się w określonej odległości $\sim 1,5$ m od miejsca obserwacji.

Projektowanie kadru przestrzenno-czasowego wymaga więc przesunięcia się z „oknem pomiarowym” do pozycji z otoczenia punktu H (wg rys. 8). Rozwiązanie takie powinno zminimalizować wpływ ośrodka rozpraszającego występującego bezpośrednio przed obiektem. Jednak pogorszeniu ulega efektywność energetyczna metody rejestracji obrazu.

Uzyskiwany w metodzie czas obserwacji obiektu powinien być krótszy niż czas przesunięcia się fragmentu sceny o wymiarze pojedynczego piksela.



Rys. 8. Graficzna wizualizacja metody diagnostycznej

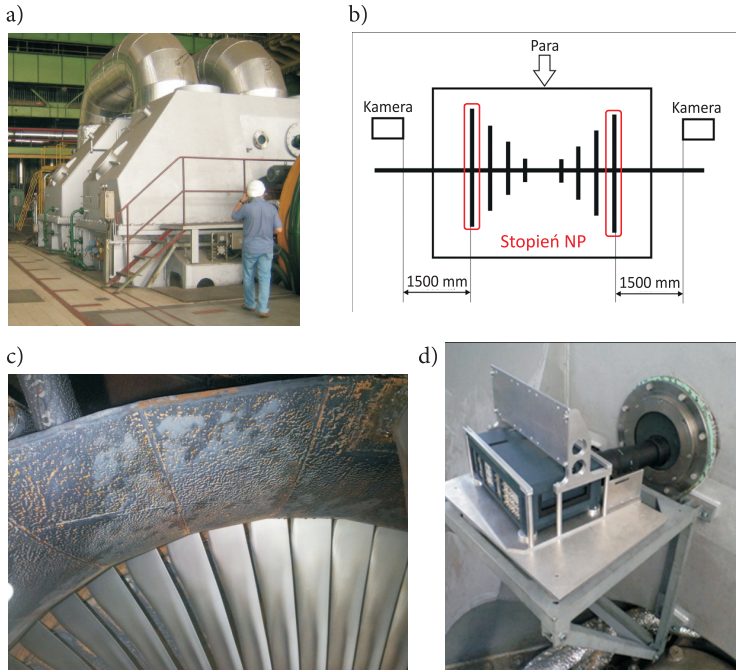
Przyjmując pole widzenia sensora ~ 5 cm i jego rozdzielczość na poziomie 1000 pikseli, uzyskujemy informacje o szacunkowym wymiarze sceny obserwowanej przez pojedynczy piksel $x \sim 50 \mu\text{m}$.

Przyjmując dodatkowo, że szacunkowa prędkość liniowa zewnętrznej krawędzi łopatek wynosi ok. 550 m/s, możemy oszacować maksymalny czas obserwacji sceny niewywołujący rozmycia obrazu $t_{\text{obs}}(\text{max}) < 90$ ns. Wynik ten jest jednocześnie informacją o wymaganym poziomie synchronizacji systemu, tzn. takim, przy którym jesteśmy w stanie pozycjonować kadr na obiekcie z dokładnością do 1 piksela.

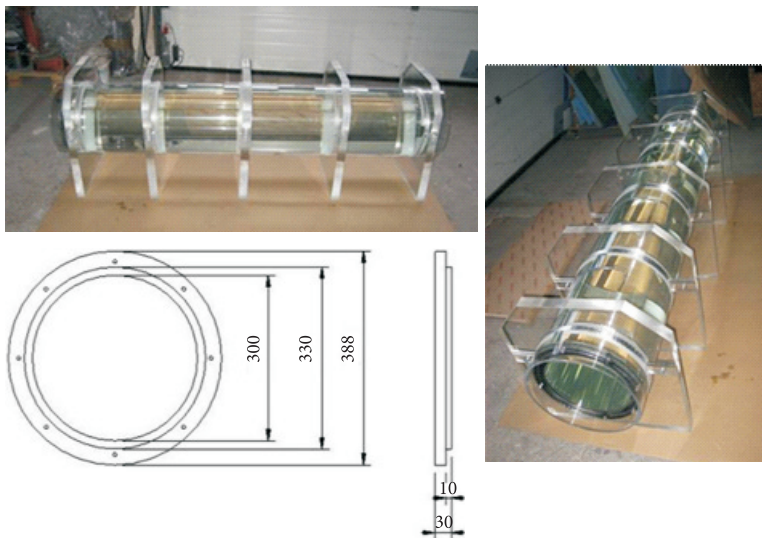
Powyższe wyniki wskazują na to, że wymagane jest użycie techniki „nanosekundowej” zarówno po stronie nadajnika, jak i odbiornika systemu.

5. Stanowiska pomiarowe

Równie ważną kwestią jak dostosowanie metody pomiarowej do problemu diagnostycznego jest kwestia dostępności obserwacyjnej do obiektu badań. Na potrzeby projektu do testowania metody wybrana została jedna z turbin w elektrowni Jaworzno III. Poniższy rysunek nr 9 przedstawia planowaną lokalizację systemu pomiarowego umożliwiającego obserwację stopnia NP turbiny 13k225.



Rys. 9. Turbina 13k225 w elektrowni Jaworzno III: a) blok energetyczny; b) możliwe lokalizacje systemu pomiarowego względem obiektu badań; c) łopatki turbiny podczas postoju; d) podest z urządzeniem fotografii laserowej usytuowanym naprzeciwko okna rewizyjnego

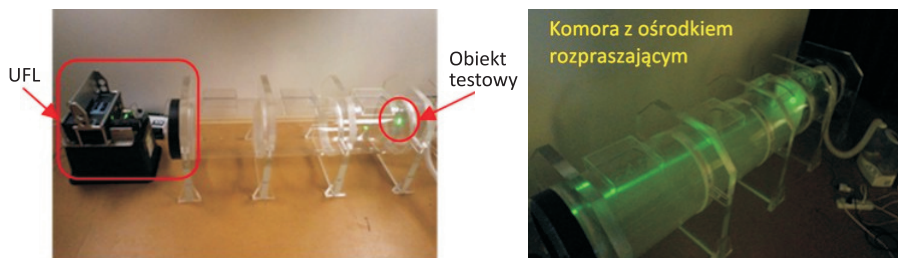


Rys. 10. Laboratoryjna komora pomiarowa

W celu weryfikacji w warunkach laboratoryjnych różnych aspektów metody pomiarowej wykonana została komora pomiarowa o długości ~ 2 m i średnicy 40 cm (rys. 10).

6. Wyniki testów

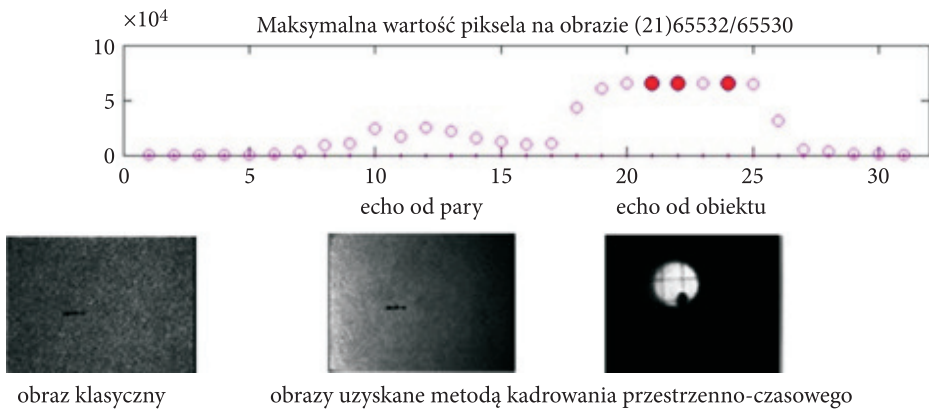
W związku z przedłużającymi się pracami instalacyjnymi w elektrowni Jaworzno III większość przeprowadzonych badań testowych zostało wykonanych z użyciem komory pomiarowej z umieszczanymi wewnątrz obiektami testowymi (rys. 11) i dotyczyły one m.in. rejestracji obrazu obiektu przy: różnych poziomach ośrodka rozpraszającego, dużych szybkościach liniowych. Testowano także czynniki wpływające na jakość obrazu, np. wpływ polaryzacji promieniowania.



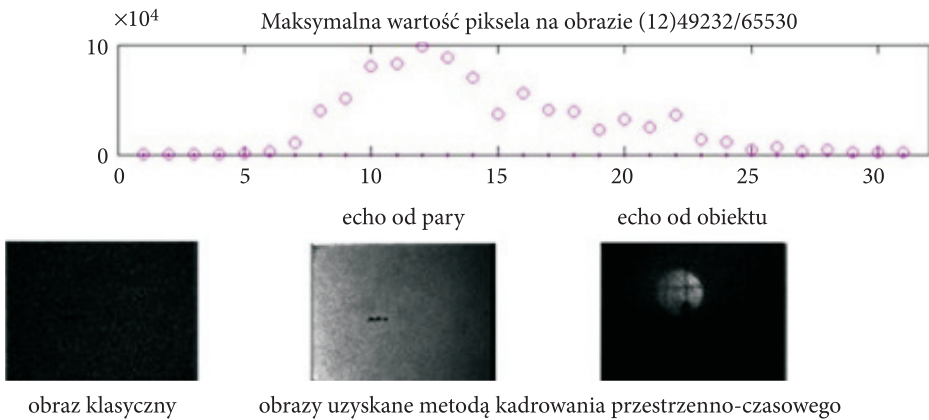
Rys. 11. Konfiguracja stanowiska badawczego podczas testów

W zakresie weryfikacji możliwości obserwacji w obecności ośrodka rozpraszającego, badania testowe potwierdziły, że widoczność obiektu determinuje gęstość rozproszenia oraz odległość do obserwowanej sceny. Poniżej przedstawiono przypadki (skanowania w odległości obserwowanej sceny z krokiem 15 cm przy czasie trwania oświetlania 3 ns i czasie detekcji 3 ns) pokazujące sytuacje, gdy: echo od obiektu jest silniejsze od echa pary (rys. 12), dominuje wpływ echa od pary przy słabym sygnale echa od obiektu (rys. 13). Ostatni z przykładów (rys. 14) pokazuje sytuację, gdy mimo słabo zarysowanego sygnału echa od obiektu jego obraz nie jest już dostrzegalny.

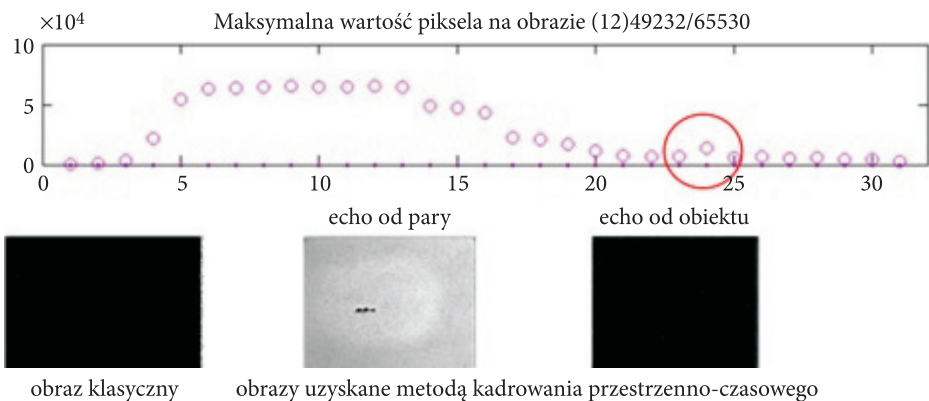
Testy z dużymi prędkościami liniowymi przeprowadzono z użyciem urządzenia Opticalchopper. Aby uzyskać odpowiednik większej prędkości liniowej, obrazy były rejestrowane w trybie makro. Uwzględniając maksymalną szybkość obrotów 15-polowej tarczy, jej rozmiar oraz pole widzenia kamery, udało się uzyskać ekwiwalentną prędkość liniową ok. 150 m/s (co stanowi $\sim 0,3$ prędkości liniowej łopatek). Uzyskane wyniki z testów przedstawiono na rysunku 15. W przypadku rejestracji obrazu z długą migawką (30 μ s) widoczne jest rozmycie obiektu na obrazie ($\sim 64,75$ pikseli) czyli $\sim 0,5$ mm. W przypadku 3ns migawki trybu kadrowania przestrzenno-czasowego rozmycie nie jest już widoczne.



Rys. 12. Przypadek — echo od obiektu jest silniejsze od echa od pary



Rys. 13. Przypadek — echo od obiektu słabsze od echa od pary



Rys. 14. Przypadek — bardzo słabe echo od obiektu (brak obrazu)

potwierdziły się. Uzyskane obrazy pokazały zalety aktywnego obrazowania nad metodą klasyczną. W badaniach eksperymentalnych wykazano, że możliwy jest do uzyskania czytelny obraz przy obecności pary, jednak istnieją ograniczenia co do jej gęstości i odległości do obserwowanej sceny. Istotną rzeczą jest konieczność separacji echa od mgły i obiektu, co warunkuje geometria sceny, panujące warunki obserwacyjne i parametry czasowe akwizycji (dążenie do minimalizacji czasów oświetlenia i detekcji). W ramach przeprowadzanych testów wykazano, że poprawę jakości obrazu można uzyskać poprzez zwiększenie energii oświetlacza i/lub wzmocnienia toru odbiorczego, ale tylko do pewnej granicy zależnej od wielkości rozproszenia. Poprawę kontrastu obrazu można uzyskać np. poprzez zastosowanie polaryzacji światła w torze nadawczym i odbiorczym. Testy wykazały również, że w procesie optymalizacji parametrów akwizycji obrazu należy zwrócić uwagę na czas trwania detekcji obrazu i położenie środka kadru na diagramie przestrzenno-czasowym — w przypadku obecności ośrodka rozpraszającego środek kadru należy przesunąć za pozycję obiektu.

9. Podsumowanie

Aktywna technika rejestracji obrazu metodą kadrowania przestrzenno-czasowego może stanowić cenne narzędzie diagnostyczne. Dzięki swoim unikalnym własnościom oferuje szeroki wachlarz trybów akwizycji danych, począwszy od klasycznego obrazowania, a skończywszy na trybie selekcji przestrzeni i czasu. Klasyczne obrazowanie znajduje zastosowanie w przypadkach, gdy nie jest wymagana selekcja przestrzenna obserwowanej sceny, a obserwowane obiekty i zjawiska nie charakteryzują się dużą dynamiką. Tryb szybkiej migawki lub krótkoczasowego oświetlenia znajduje zastosowanie do rejestracji dynamicznych procesów. Najbardziej zaawansowany, a jednocześnie oferujący unikalne możliwości jest tryb szybkiej migawki i krótkoczasowego oświetlenia. Tego typu rozwiązanie może znaleźć zastosowanie tam, gdzie:

- wymagana jest selekcja przestrzenna obserwowanej sceny,
- mamy do czynienia z dynamicznymi zjawiskami,
- występuje zjawisko maskowania obiektu przez ośrodek rozpraszający,
- mamy do czynienia z niekorzystnym wpływem zewnętrznego promieniowania.

Aby zweryfikować możliwości obserwacyjne i pomiarowe proponowanej metody w trybie kadrowania czasu i przestrzeni, przeprowadzono szereg eksperymentów na zaaranżowanym stanowisku pomiarowym. Uzyskane rezultaty potwierdziły możliwości selekcji czasu i przestrzeni obrazowania, a także rejestracji obrazu w obecności przesłaniania obiektu przez ośrodek rozpraszający. Zasięg takiego obrazowania jest oczywiście odwrotnie proporcjonalny do stopnia rozpraszania

promieniowania. Kolejne testy przeprowadzane na przygotowanym stanowisku pomiarowym w elektrowni Jaworzno III powinny zweryfikować możliwość użycia proponowanej techniki w diagnostyce łopatek turbin parowej.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na IX Krajowej Konferencji „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów — DIAG’2015”, Ustroń 22-25.09.2015.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.07.2015 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 12.10.2015 r.

LITERATURA

- [1] ORŁOWSKI Z., *Diagnostyka w życiu turbin parowych*, WNT, Warszawa, 2001.
- [2] POWAŁKA B., CHODŹKO M., JASIŃSKI W., *Diagnostyka łopatek wirnika turbozespołu*, Modelowanie inżynierskie, 41, 2011, 339-346.
- [3] MAZUR Z., GARCÍA-ILLESCAS R., PORCAYO-CALDERÓN. J., *Last stage blades failure analysis of a 28 MW geothermal turbine*, Engineering Failure Analysis, 2009, s. 1020-1032.
- [4] PROCHAZKA P., VANEK F., *Contactless Diagnostics of Turbine Blade Vibration and Damage*, J. Phys. Conf. Ser. 305 012116, 2011.
- [5] PISZCZEK M., *Laser Photography — Examples of Processing of Image Information*, Acta Physica Polonica A, vol. 124, no. 3, 2013, 546.
- [6] PISZCZEK M., *Aktywne obrazowanie w monitoringu i diagnostyce technicznej*, Biul. WAT, 63, 3, 2014, 103-113.

M. PISZCZEK

Technical diagnostics of objects using active imaging

Abstract. The article presents an original method of the space-time framing as a potential tool for technical diagnostics. Because of the unusual observation and measurement properties such as the selection of the observed spatial scenes, the proposed technique of recording video data can be used in many situations where traditional cameras are not able to assume the tasks. The proposed use of the experimental Laser Photography Device (LPD) concerns the issue of diagnosis of steam turbine blades.

Keywords: active imaging, image processing, diagnostics

DOI: 10.5604/12345865.1186227

