

# Wprowadzenie do zaawansowanych technik pomiarowych 3d stosowanych w wideoboroskopowych zdalnych badaniach wizualnych

## Cześć 2-ga – dokładność pomiaru

Introduction to advanced 3d measurement techniques used in wideoboroskopowych remote visual studies  
2nd part – measuerement accuracy

### Streszczenie

Wprowadzenie technologii 3D do Zdalnych Badań Wizualnych znacznie podnosi funkcjonalność współczesnych wideoboroskopów przemysłowych. Sprzęt wyposażony w technologię pomiarów 3D znacznie poszerza zakres stosowalności badań wizualnych w badaniach NDT. W poprzednim artykule zostały omówione możliwości współczesnych wideoboroskopów w zakresie wymiarowania oraz trójwymiarowej analizy wykrytych wskazań i nieciągłości. Niniejszy artykuł przedstawia nowe typy pomiarów oraz analizę ich dokładności.

**Słowa kluczowe:** badania; pomiar; 3D

### Abstract

The introduction of 3D measurement technology for Remote Visual Inspections significantly increases the functionality of modern industrial video borescopes. Devices equipped with a 3D measurement technology greatly expands the scope of application of visual research in the study of NDT. Previous article has presented research capabilities and offered entered measuring technology. This article describes new types of measurement and their typical accuracy.

**Keywords:** research; measurement; 3D

### Wstęp

W procesie eksploatacji obiektów przemysłowych badania diagnostyczne zajmują istotną pozycję w polityce zapewnienia bezpieczeństwa pracy instalacji i urządzeń, zwłaszcza w przypadku długotrwałego obciążenia materiału konstrukcyjnego.

Współczesne systemy endoskopowe zapewniają możliwość inspekcji wewnętrznej obiektów o dużej komplikacji kształtów z wykorzystaniem istniejących otworów technologicznych bez konieczności ingerencji w obiekt celem wprowadzenia sondy pomiarowej, co ma istotne znaczenie w diagnostyce urządzeń energetycznych o wysokim reżymie eksploatacyjnym.

Stojąc przed problemem właściwego doboru badania endoskopowego dla danego problemu technicznego konieczne jest określenie warunków badania, dostępności

do badanego obiektu oraz prawidłowy dobór metody pomiarowej zapewniającej sukces metrologiczny. Niekiedy do osiągnięcia zamierzonego efektu badania należy zastosować zespół metod obserwacji i pomiaru. Bardzo istotnym elementem badania jest pewność wyboru metody i możliwość weryfikacji na bieżąco jakości jej zastosowania. Odzwierciedla się to w pewności identyfikacji obserwowanego uszkodzenia i dokładności przeprowadzonych pomiarów. Problematyka dokładności pomiaru z zastosowaniem nowych metod pomiarowych została przybliżona podczas KKBN 2015. Obecnie chcemy przedstawić możliwości szacowania błędu pomiaru oraz sposobu zapewnienia najwyższej jakości inspekcji wideoboroskopowej [2].

Możliwość oszacowania błędu pomiarowego jest

**Mgr Dariusz Mężyk** – Instytut Energetyki w Warszawie, **mgr Paweł Stasiak** – Everest Polska Sp. z o.o.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [dariusz.mezyk@ien.com.pl](mailto:dariusz.mezyk@ien.com.pl)

kluczowa dla każdej metody pomiaru. W poprzednim artykule omówiono narzędzia pozwalające unikać błędów wynikających z błędnego, często nieświadomego, umiejscowienia kursorów pomiarowych przez operatora. Wyeliminowanie tych systematycznych błędów operatora znacznie podnosi zaufanie do uzyskiwanych wyników oraz zwiększa ich powtarzalność, co w połączeniu z precyzyjnie oszacowanym błędem pomiarowym, każdego indywidualnego pomiaru, pozwala na ich wykorzystywanie przy podejmowaniu strategicznych decyzji dotyczących dalszej eksploatacji badanego obiektu.

## Dokładność pomiaru – od czego zależy? W jaki sposób ją szacować?

Zdalne badania wizualną są często podstawą dopuszczenia instalacji do pracy. Decyzja ta bardzo często jest podejmowana w oparciu o wyniki pomiarów wskazań i nieciągłości. Niedokładne pomiary mogą skutkować niepotrzebnym odstawieniem instalacji, kosztami przedwczesnego remontu lub ryzykiem awarii i zagrożeniem życia. Dlatego ważne jest aby system pomiarowy był wykorzystywany z pełną świadomością jego możliwości ale i ograniczeń.

Dokładne pomiary wymagają:

- przeszkolonego personelu,
- sprawnego i poprawnie skalibrowanego sprzętu,
- wyboru odpowiedniego typu pomiaru,
- poprawnego umiejscowienia punktów pomiarowych,
- świadomej analizy dokładności uzyskanych wyników.

Dokładność uzyskiwanych wyników zależy od dwóch kategorii czynników: stałych i zmiennych, indywidualnych dla każdego pomiaru. Do pierwszej kategorii należą parametry samego systemu: jakość obrazu, rozdzielczość, klasa optyki, ilość światła zapewniająca odpowiedni kontrast, dostępność odpowiednich typów pomiarowych, okno zoom wokół kursora pomiarowego, wsparcie ze strony producenta sprzętu w zakresie analizy wyników, etc.,. Tylko obraz odpowiedniej jakości z wyraźnie widocznymi szczegółami umożliwia poprawne pomiary. Odpowiednie oświetlenie badanego obszaru zapewnia kontrast oraz eliminuje szумы generowane przez analizę niedoświetlonego obszaru. Ilość światła jest podstawowym i kluczowym parametrem badań wizualnych. Niedobór oświetlenia może zostać częściowo skompensowany dzięki zaawansowanym technikom obróbki obrazu, różnie nazywanym i realizowanym przez różnych producentów sprzętu, ale tylko w ograniczonym zakresie. Kluczowe jest aby system pomiarowy był w stanie zapewnić wystarczające natężenie światła w badanym obszarze, a techniki analizy obrazu stosował tylko jako wsparcie w niewielkim zakresie pola widzenia, a nie jako standardową procedurę. Konieczność zapewnienia odpowiednich warunków oświetlenia i jakości uzyskiwanych obrazów ogranicza zakres stosowalności Zdalnych Badań Wizualnych, a systemów pomiarowych w szczególności. Pierwsze ograniczenie to odległość z której możliwe jest wykonywanie, przydatnych pomiarów, zdjęć do kilkudziesięciu (20-30) milimetrów, drugie to zakres pola widzenia stosowanych obiektywów. System o określonej rozdzielczości przetwornika obrazu, kalibrowany w oparciu o analizę obrazu (metoda Stereo), nie powinien stosować obiektywów o polu widzenia szerszym niż 50-60°. Zastosowanie obiektywów szerokokątnych przy tej metodzie pomiarowej znacznie obniża jej wiarygodność i dokładność poza akceptowalne limity. Obiek-

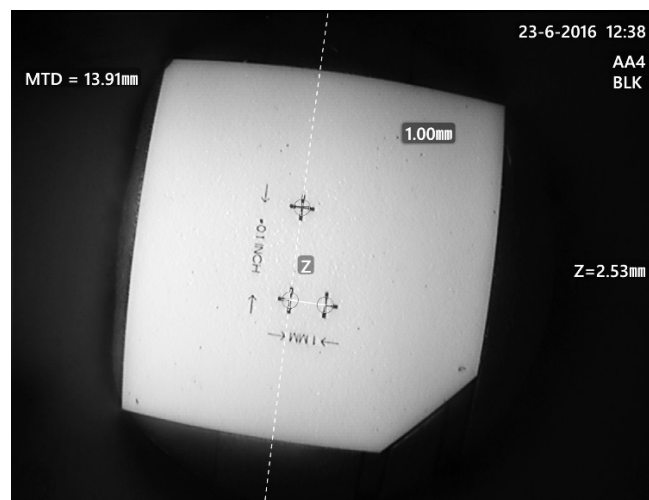
tywy z szerszym polem widzenia ok. 100°, można stosować w sytuacji gdy metoda kalibracji (pomiaru) nie jest bezpośrednio zależna od natywnej rozdzielczości przetwornika obrazu np. pomiar Fazowy 3D. Rozdzielczość obrazu ma wpływ tylko na dokładność umiejscowienia punktów pomiarowych [3].

Drugą kategorię czynników wpływających na dokładność pomiaru, stanowią warunki wykonywania konkretnego pomiaru: odległość od obiektu, kąt patrzenia w trakcie wykonywania pomiaru, stan badanej powierzchni (obecność refleksów, odbić, porowatości), poziom oświetlenia oraz decyzja operatora o umieszczeniu kursorów pomiarowych.

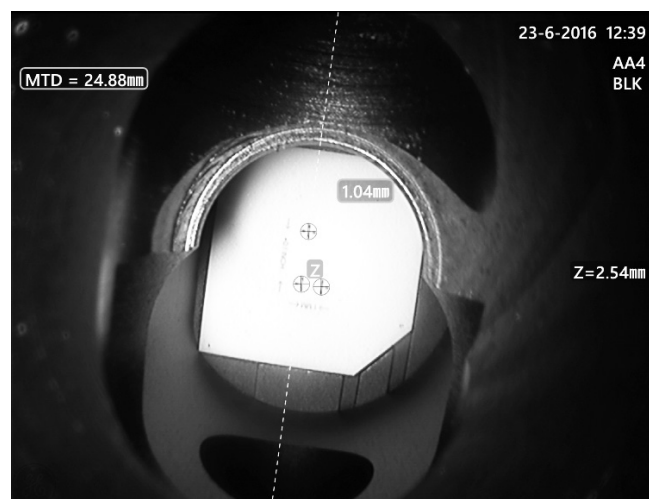
O ile na stałe parametry systemu operator nie ma większego wpływu (poza etapem zakupu danego rozwiązania sprzętowego), o tyle zmienne parametry, decydujące o dokładności uzyskiwanych wyników, są zależne od jego wiedzy i świadomości wykonywanych procedur.

Podstawowym parametrem zmiennym, decydującym o dokładności pomiaru, zależnym od decyzji operatora jest odległość końcówki sondy pomiarowej od badanego obiektu. Przy danych parametrach systemu, dokładność uzyskiwanych wyników jest wprost proporcjonalna do powiększenia optycznego wynikającego ze zjawiska perspektywy; im bliżej obiektu tym dokładniejszy pomiar. Ważne jest również, aby stosowany system w prosty i jednoznaczny sposób wspierał kontrolę tego parametru.

Na rysunkach 1 i 2 pokazano pomiar tego samego elementu z różnych odległości.



Rys. 1. Pomiar z niewielkiej odległości od obiektu  
Fig. 1. Close distance measurement



Rys. 2. Pomiar z większej odległości od obiektu  
Fig. 2. Far distance measurement

Widoczny na obu rysunkach parametr MTD określa odległość końcówki sondy do najbardziej oddalonego punktu pomiarowego. MTD (Maximum Target Distance) to odległość najbardziej oddalonego punktu pomiarowego, wybranego przez operatora w trakcie pomiaru, od końcówki sondy. Jest ona wyliczana na bieżąco i podawana na ekranie systemu w mm (lub calach), jest to informacja dla operatora czy wykonany pomiar mieści się w akceptowalnym zakresie błędu. Zaawansowane systemy pomiarowe, w oparciu o zdefiniowane krzywe dokładności, analizują wielkość mierzonej nieciągłości w porównaniu z MTD i sygnalizują (rys. 2 pomarańczowa obwódka wokół wyniku pomiaru) jeśli dla danej odległości procentowy udział przewidywanego błędu stanowi zbyt dużą część uzyskanego wyniku. Jest to bardzo pomocny mechanizm, pozwalający jeszcze na obiekcie, w trakcie wykonywania inspekcji, wykonać lepsze, np. z mniejszej odległości zdjęcie pomiarowe. Mechanizm taki zapobiega konieczności powtarzania badania w celu poprawy uzyskiwanych wyników [1]. Dodatkowym bardzo przydatnym mechanizmem jest natychmiastowe (po wykonaniu zdjęcia) oznaczanie obszarów, które z powodu złej jakości obrazu nie będą mogły być wymiarowane, lub których wartość pomiarowa jest wątpliwa. Obszary znajdujące się poza głębią ostrości obiektywu, obszary zasłonięte refleksami i odbiciami od błyszczącej powierzchni, obszary niedostatecznie oświetlone, etc. mogą być dzięki temu wyeliminowane poprzez ponowne wykonanie zdjęcia pomiarowego pod innym kątem, z innej odległości lub przy użyciu innego obiektywu pomiarowego, lub wręcz inną metodą pomiarową.

Poza oczywistą potrzebą dokładnego umiejscowienia kursora pomiarowego na obrazie o dobrze widocznych szczegółach, na dokładność pomiaru wpływa również systematyczny błąd generowany przez sam system pomiarowy. Jego dokładność jest tym wyższa,

im bliżej znajduje się badany obiekt. Wynika to bezpośrednio ze specyfiki kalibracji i przeliczania wartości poszczególnych pikseli rejestrowanego obrazu na wartości mierzone. Przykładowe zależności średniego błędu pomiarowego w funkcji odległości, przedstawiają wykresy, dostarczone przez producenta sprzętu, pokazane na rysunkach 3 i 4.

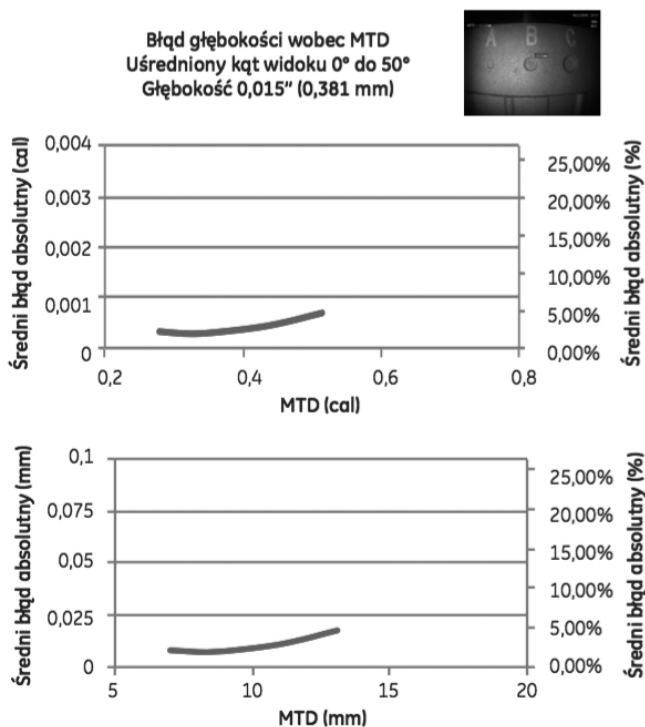
Są to przykładowe wykresy dostarczane przez producenta sprzętu. Wykresy tego typu, dostarczane dla każdego typu pomiaru są wiarygodną i jednoznaczną podstawą do precyzyjnego szacowania wielkości błędu pomiarowego w zależności od wartości MTD - odległości z jakiej wykonano dany pomiar. Są one również częścią automatycznego systemu szacowania błędu, stanowiącego element interaktywnej pomocy umieszczonej w urządzeniu pomiarowym, ostrzegającym przed niezadawalającym poziomem dokładności uzyskanego wyniku. Najczęściej zalecaną praktyką jest wykonywanie pomiaru z minimalnej odległości, pozwalającej jeszcze uchwycić cały mierzony element w polu widzenia systemu, oraz umiejscowienie sondy względem badanego obiektu zapewniające jak najlepszą czytelność szczegółów analizowanego obszaru.

## Wybór odpowiedniego typu pomiaru

Dana wielkość może być zmierzona na różne sposoby, jednak wybór odpowiedniego typu pomiaru pozwala znacznie ograniczyć systematyczne błędy pomiarowe wynikające najczęściej z błędnego umiejscowienia kursorów przez operatora.

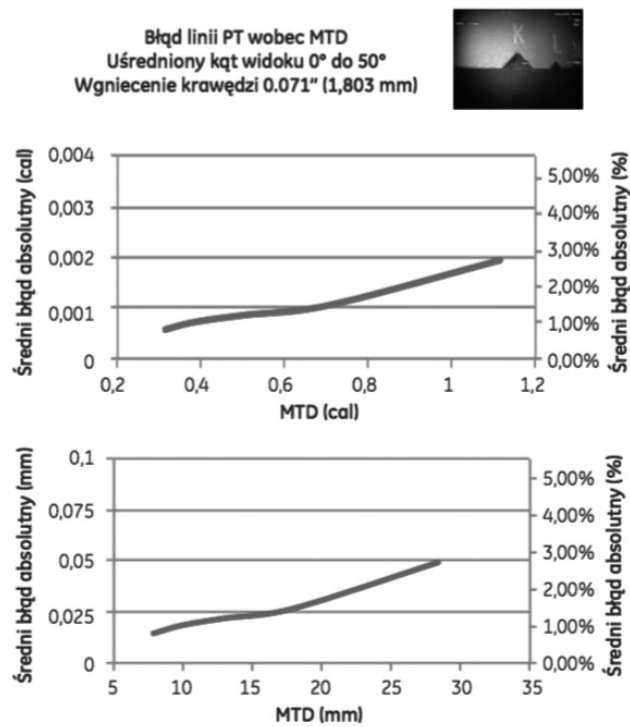
Inspektor prowadzący badania ma do wyboru następujące typy pomiaru:

- Długość – prosty pomiar odległości pomiędzy dwoma punktami,



Krzywa dokładności dla pomiaru głębokości wgniecenia lub wgłębienia.

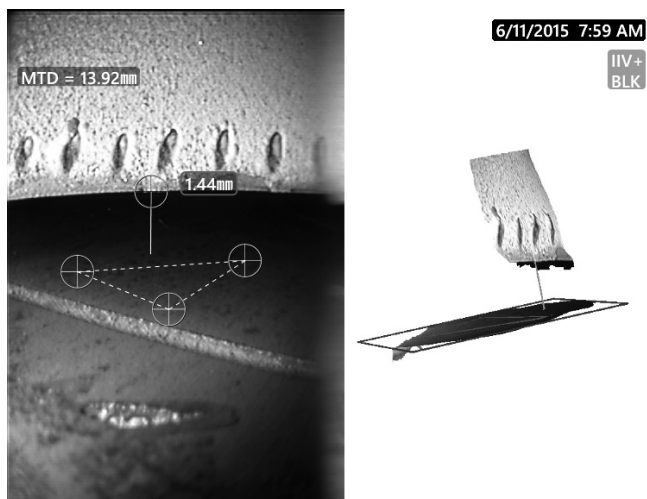
Rys. 3. Krzywa dokładności pomiaru [1]  
 Fig. 3. Accuracy curve



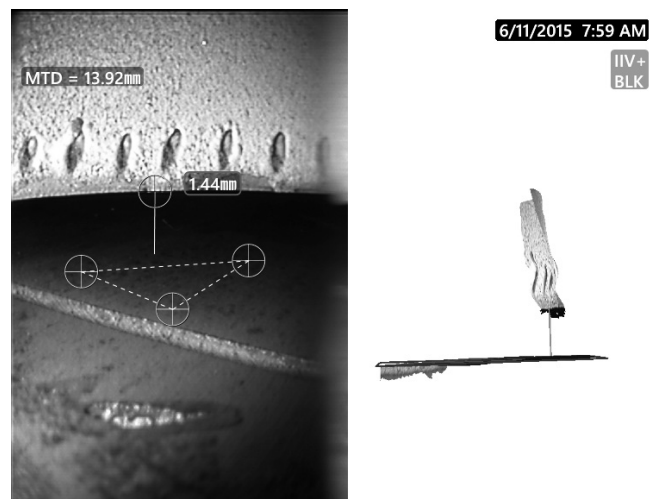
Krzywa dokładności punktu wobec linii pomiarowej wgniecenia krawędzi.

Rys. 4. Krzywa dokładności pomiaru [1]  
 Fig. 4. Accuracy curve

- Punkt do linii – pomiar odległości punktu od linii przechodzącej przez 2 punkty,
  - Głębokość – odległość punktu od płaszczyzny wyznaczonej przez 3 punkty,
  - Obszar – pole powierzchni ograniczonej łamaną, wyznaczoną przez punkty,
  - Wielosegmentowe – długość łamanej wyznaczonej przez punkty,
  - Profil głębokości – przekrój w płaszczyźnie prostopadłej przechodzącej przez dwa punkty na powierzchni badanej,
  - Profil głębokości obszaru – automatyczna analiza profilu głębokości na całym, wybranym przez operatora, obszarze,
  - Płaszczyzna pomiarowa – wirtualna płaszczyzna, wspólna z wybranym obszarem materiału rodzimego, umożliwiającą precyzyjne umiejscowienie kursorów pomiarowych
- Wybór błędnego typu pomiaru prowadzi do niewłaściwych wyników. Kluczowym warunkiem poprawności pomiaru jest zapewnienie prostokątności odcinka łączącego powierzchnię obudowy z krawędzią łopatki.
- Wybór pomiaru typu Głębokość, czyli odległości punktu od płaszczyzny zdefiniowanej przez trzy punkty pomiarowe jest tutaj jedynym, właściwym wyborem. Poprawność tego rozwiązania prezentują rysunki 5 i 6.



**Rys. 5.** Pomiar typu Głębokość – wizualizacja położenia znaczników  
**Fig. 5.** Measurement type Depth – visualization of the position of the markers



**Rys. 6.** Pomiar typu Głębokość – prawidłowe położenie znaczników  
**Fig. 6.** Depth Measurement type – the correct position of the markers

## Podsumowanie

Obserwacja wnętrza obiektu, a następnie analiza zarejestrowanego obrazu umożliwia dokładne zlokalizowanie wady, a wykorzystanie możliwości techniki 3D, dokładne i jednoznaczne zwymiarowanie bez konieczności demontażu obiektu, a zatem nie występuje niszczące oddziaływanie oprzyrządowania na badany obiekt.

Wprowadzenie technologii 3D do Zdalnych Badań Wizualnych znacznie podnosi funkcjonalność współczesnych wideoboroskopów przemysłowych. Sprzęt wyposażony w technologię pomiarów 3D znacznie poszerza zakres stosowalności badań wizualnych w badaniach NDT. Możliwość weryfikowalnych i powtarzalnych pomiarów może stanowić samodzielną podstawę do podjęcia decyzji o dalszej eksploatacji silnika lotniczego, turbiny gazowej lub innego urządzenia bez konieczności demontażu.

Niniejszy materiał to zaledwie wstęp do zagadnienia nowego podejścia techniki pomiarów 3D w badaniach wizualnych, mający uświadomić zmiany zachodzące w tej metodzie badań nieniszczących.

Podsumowując, można stwierdzić, że badania wizualne z zastosowaniem systemów wideoendoskopowych spełniają założenia stawiane przed diagnostyką techniczną obiektów przemysłowych, będąc niekiedy jedyną możliwą do zastosowania metodą rewizyjną.

## Literatura

- [1] VideoProbe 3D Measurement Handbook GEA31907 06/2015.
- [2] D. Mężyk: Zastosowanie badań wizualnych w procesie diagnostyki obiektów energetycznych – metody pomiarowe w endoskopii przemysłowej, 4. Konferencja naukowo-techniczna diagnostyka materiałów i urządzeń technicznych, Gdańsk, 2012.
- [3] D. Mężyk: Wykorzystanie endoskopii przemysłowej w procesie badań wizualnych jako metody diagnostyki obiektów przemysłowych” – Dozór Techniczny 3/2010.
- [4] D. Mężyk, P. Stasiak: Wprowadzenie do zaawansowanych technik pomiarowych 3D stosowanych w wideoboroskopowych zdalnych badaniach wizualnych, Przegląd Spawalnictwa nr 6/2016