



## EVOLUTION OF EQUIPMENT FOR TESTING OF WIRE ROPES IN THE TAPERED END SECTIONS

*Jerzy Kwaśniewski<sup>1</sup>, Hubert Ruta<sup>2</sup>*

**Key words:** diagnostics, wire ropes, magnetic head for non-destructive testing of rope

### **Abstract:**

The study presents the problem of evolution of equipment for non-destructive testing ropes near fixed points. Wire ropes are key elements of installations with flexible connectors. They are widely used in various sectors of industry: in mining, steel-making, materials handling, tourism and in erection of high structures etc. Application of a measuring head with rotating sensors enables the detection of faults located inside steel rope near the tapered end sections. The device is provided with pole pieces adaptable to various shapes of the tapered sections. Development of new diagnostic methods and tools is necessary to ensure the required safety levels in machine operation. Application of Computer-aided Engineering software and FEM modelling approach to the design and prototyping makes the fabrication NDT (Non-Destructive Testing) devices an easier and cheaper task, improving their efficiency and performance. Furthermore, computer methods allow the multi-criterial optimisation of diagnostic devices in the context of the specified objective functions.

### **1. Wstęp**

Konstrukcje ciągnowe należą do bardzo ekonomicznych i nowoczesnych konstrukcji inżynierskich [3]. Są bezkonkurencyjne w rozwiązaniach o dużych rozpiętościach, w urządzeniach z ciągnami przenoszącymi duże siły dynamiczne i znajdują zastosowanie w takich obiektach budowlanych, jak np.:

- urządzenia górnictwa odkrywkowego (zwałowarki itp.)
- górnicze wyciągi szybowe (z linami prowadniczymi)
- mosty wiszące i podwieszane
- maszty radiowo – telewizyjne i kominy z odciągami
- hale widowiskowo - sportowe z dachami opartymi na ciągnach
- wyciągi narciarskie i kolejki linowe
- napowietrzne linie energetyczne
- urządzenia do transportu ludzi

Głównymi elementami konstrukcji ciągnowych są liny stalowe. W trakcie eksploatacji znajdują się one w określonym, często bliżej nie znanym stanie. Sekwencje czasowe tych stanów mogą służyć do określenia czasu bezpiecznej eksploatacji lin konstrukcji ciągnowych na które działa wiele czynników prowadzących do zmiany ich stanu technicznego. Przyjęcie odpowiednich algorytmów diagnozowania stosowanych w diagnostyce technicznej lin stalowych pozwala na określenie aktualnego stanu obiektu, jego przeszłości oraz przewidywanie przyszłych zmian stanu.

<sup>1</sup> **dr hab. inż. Jerzy Kwaśniewski prof.AGH**, University of Science and Technology, Department of Rope Transport, al. Mickiewicza 30 paw. B-2, 30-059 Kraków, Poland, Tel.: +48 12 634 35 37, e-mail: [kwasniew@imir.agh.edu.pl](mailto:kwasniew@imir.agh.edu.pl)

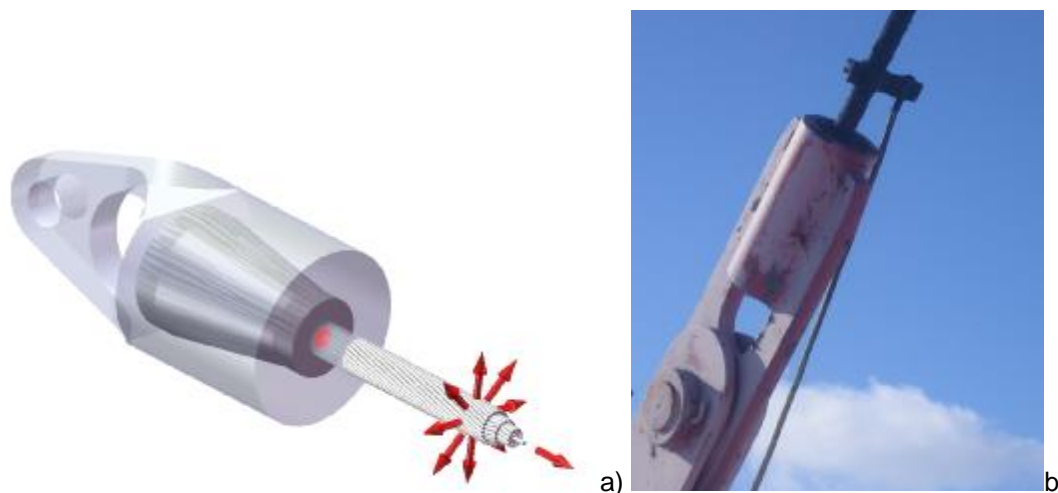
<sup>2</sup> **mgr inż. Hubert Ruta**, University of Science and Technology, Department of Rope Transport, al. Mickiewicza 30 paw. B-2, 30-059 Kraków, Poland, Tel.: +48 12 634 35 37, e-mail: [hubert.ruta@agh.edu.pl](mailto:hubert.ruta@agh.edu.pl)

Oprócz wielu zalet konstrukcje cięgnowe mają pewne wady. Dotyczy to zagadnień związanych z zakotwieniem cięgien, z przeniesieniem sił z cięgien na fundamenty lub konstrukcję, z ustaleniem właściwej geometrii ustroju i zrealizowaniem wstępnego sprzężenia ustroju. Również istotnym staje się możliwość oceny stanu zakończeń lin stalowych ustrojów cięgowych. Do tej pory badano liny metodą magnetyczną z pozostawieniem nie przebadanych niewielkich odcinków ze względu na brak technicznych możliwości dojazdu głowicy pomiarowej do jej końca.

Połączenie liny ze stożkiem jest połączeniem trwałym - końcowy odcinek liny rozpleciony na pojedyncze druty w tzw. „miotłę”, zalewany jest zwykle ciekłym metalem lub żywicą w tzw. „stożek” (kielich). Charakter pracy zamocowań tego typu jest niekorzystny ze względu na to, iż lina przenosząc obciążenia jest rozciągana zazwyczaj zmienną, co do wartości siłą i wprowadzana w drgania, zaś stożek jest mocowany zwykle przegubowo w taki sposób, iż odebranych jest 5 stopni swobody (pozostaje tylko obrót wokół osi sworznia mocującego).

Biorąc pod uwagę takie czynniki jak:

- Ø różnica sztywności obu elementów tworzących połączenie lina - stożek;
- Ø nagła zmiana przekroju elementu konstrukcyjnego, powodująca obniżenie wytrzymałości zwane „zjawiskiem karbu”;
- Ø drgania liny oraz możliwość powstania lokalnego punktu obrotu;
- Ø różnica własności mechanicznych materiałów z których wykonana jest lina i stożek;
- Ø zmęczeniowy charakter pracy drutów w linie, narażonych na ciągłe wielokierunkowe przeginięcie, należy stwierdzić, iż strefa przejścia liny w stożek jest miejscem bardzo newralgicznym, szczególnie narażonym na koncentrację naprężeń i w następstwie pęknięcia drutów. Wizualna kontrola takiego połączenia wyklucza możliwość wykrycia wad drutów znajdujących się wewnątrz liny.



**Rys. 1** Zamocowanie liny w stożku – a) model 3D, kierunki drgań i obciążenie, b) wykonanie fizyczne

## 2. Sposoby diagnozowania zakończeń lin stalowych

W górnictwie węglowym często stosowane są cięgna zakończone uchwytem stożkowym pracujące jako liny przewodnicze wyciągów szybowych. Również w urządzeniach górnictwa odkrywkowego jak np. w maszynach urabiających, zwałowarko-ładowarkach, zwałowarkach itp. wykorzystywane są cięgna zakończone uchwytem stożkowym jako elementy konstrukcyjne. Podstawową metodą oceny stanu zakończeń lin jest metoda wizualna pozwalająca na wykrycie pęknięć drutów warstwy zewnętrznej, czasem korozji czy deformacji liny. Metoda ta wymaga jednak znacznej wiedzy i doświadczenia, a wyniki mają charakter jakościowy [4]. Stosując metodę magnetyczno - proszkową można jedynie obserwować powierzchnię zewnętrzną liny. Stan elementów zawieszonych górniczych urządzeń wyciągowych można badać metodą ultradźwiękową ale przed ich zamontowaniem. W warunkach przemysłowych metoda ta nie bardzo nadaje się do zastosowania. Istnieją również próby wykorzystania do badania lin w zakończeniach stożkowych radioskopii, tomografii promieniami X, ultrasonografii oraz metody rezystancyjnej. Jednak są to metody drogie, często typowo laboratoryjne nie znajdujące zastosowania w warunkach przemysłowych. Reasumując należało stwierdzić, że w świecie nie było dotychczas urządzeń i metod służących do oceny stanu lin w pobliżu ich zakończeń.

Biorąc pod uwagę rolę, jaką pełnią liny w urządzeniach, niezmiernie ważnym jest okresowe diagnozowanie stanu urządzeń i nie dopuszczenie do przekroczenia poziomów mogących stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi oraz środowiska. Na to zagrożenie decydujący wpływ ma stan liny od początku do końca jej mocowania, a w tym także w miejscach dotychczas nie badanych.

W wyniku realizacji projektu badawczego pt. „Opracowanie systemu diagnostycznego do badania stopnia zużycia lin stalowych w miejscu ich mocowania” w Katedrze Transportu Linowego

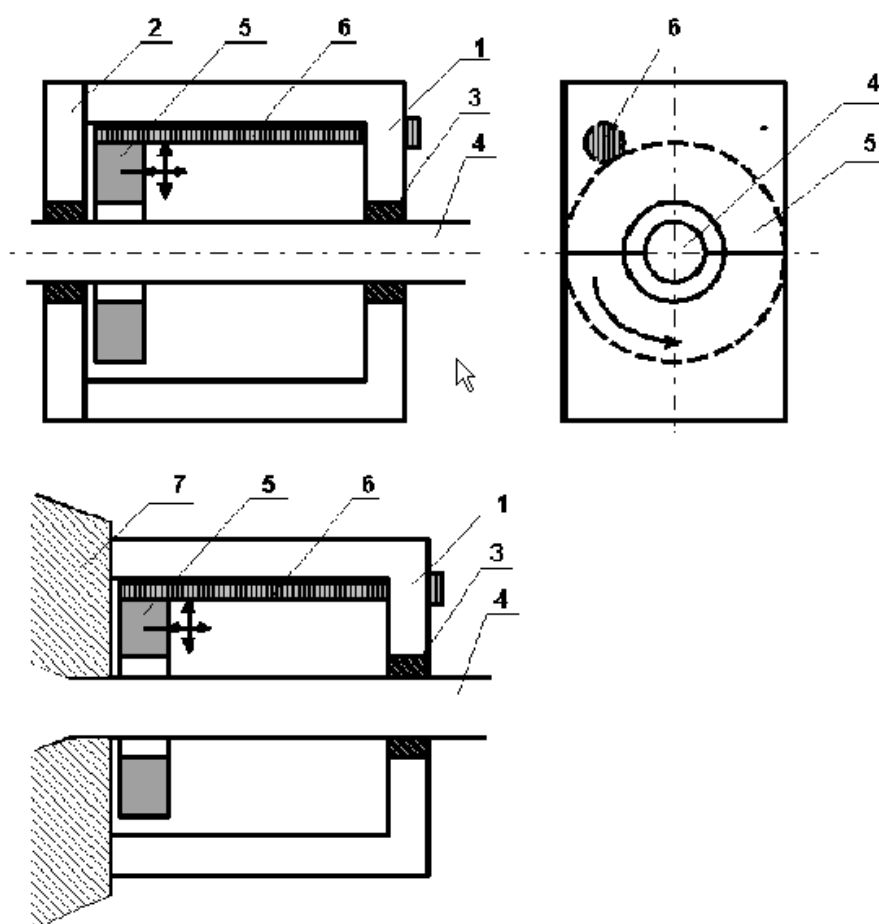
Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie, opracowano aparaturę umożliwiającą ocenę stanu technicznego wyżej wymienionej struktury również w sposób ilościowy. Metoda stałego pola, którą wybrano, polega między innymi na magnesowaniu liny stałym polem magnetycznym za pomocą odpowiednio skonstruowanego obwodu magnetycznego, przy czym linie pola w magnesowanym odcinku liny przebiegają równoległe do jej osi. Na zewnątrz liny, w miejscach zużytych (uszkodzonych) występują zjawiska w postaci zaburzeń linii pola lub zmian jego wartości (pole rozproszenia), które są wykrywane przez czujniki i zapisywane za pomocą rejestratora.

### 2.1. Techniczne założenia urządzenia do miejscowego badania zakończeń lin

W oparciu o zgłoszenie patentowe [5] opracowano założenia budowy urządzenia do badania lin w zakończeniach. Powinno ono spełniać następujące warunki:

- montaż aparatury możliwy w warunkach przemysłowych
- możliwość określania ilościowych i jakościowych zmian przekroju liny
- badanie w najbliższym sąsiedztwie wejścia do stożka
- zapewnione odpowiednie właściwości metrologiczne

Na Rys.2. przedstawiono schemat urządzenia z wirującym czujnikiem pomiarowym.



**Rys. 2** Schemat urządzenia do badania w stożku

Podstawą koncepcji urządzenia było wykorzystanie tych samych zjawisk i analogii, które występują w stosowanej powszechnie metodzie badań lin stalowych i tradycyjnych głowicach. Założono, że zmianie musi ulec obwód magnetyczny głowicy a wymagany w metodzie wzajemny ruch głowicy i liny zastąpiony zostanie przez ruch obrotowy układu pomiarowego wyposażonego w czujnik indukcyjny specjalnej konstrukcji lub przez ruch obrotowy czujnika z elementem Halla.[6]

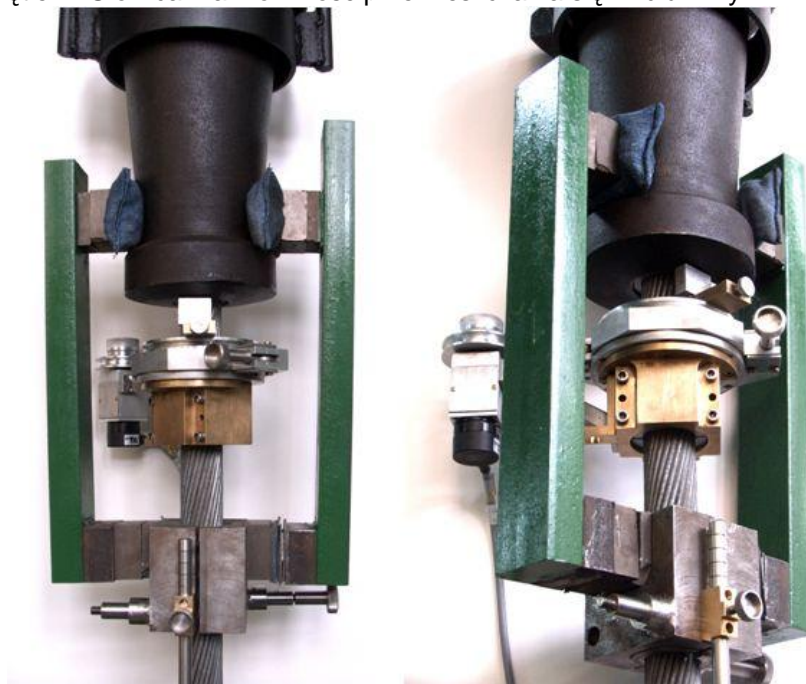
Prace rozpoczęto od wirtualnego badania zachowania się pola magnetycznego w stożku i jego pobliżu, które wykonano za pomocą komputera PC z oprogramowaniem Quick Field (2D), wykorzystującego Metodę Elementów Skończonych zwaną w skrócie MES [7].

Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych (Rys.2.) składa się z dwuczęściowego korpusu w którym umieszczone są obwody magnetyczne składające się z magnesu trwałego, nabiegunka stałego 1, wkładki kształtowych 3 dopasowanych do średnicy badanej liny. Obwód magnetyczny zwierany jest poprzez linię 4 i chwyt stożkowy 7. Wewnątrz obwodu umieszczony jest

czujnik pomiarowy 5 który wprawiany jest w ruch obrotowy lub drgający za pomocą napędu 6. W miejscu wystąpienia uszkodzenia następuje zaburzenie pola magnetycznego wokół liny 4, które zostaje wychwycone przez czujnik 5, przetwarzający to zaburzenie na sygnał elektryczny. Sygnał ten ulega dalszemu przetworzeniu w urządzeniu nie uwidocznionym na rysunku, a którym może być rejestrator napięciowy, defektograf, defektoskop lub komputer.

## 2.2. Badania laboratoryjne, symulacje numeryczne i modyfikacje konstrukcji głowicy

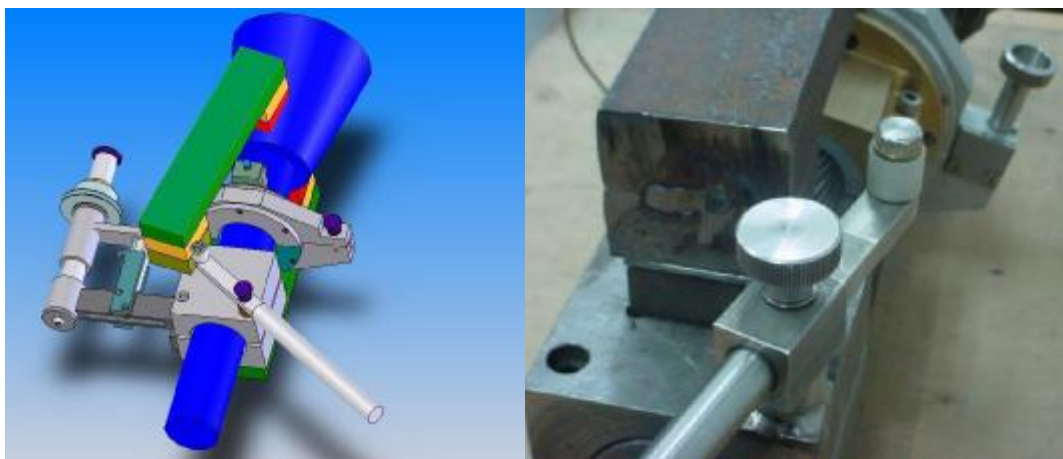
W oparciu o zgłoszenie patentowe wykonano egzemplarz laboratoryjny urządzenia pokazany na Rys. 3 [1]. Składa się ono z dwuczęściowego obwodu magnetycznego zakładanego na linę i uchwyt stożkowy. Na linie znajduje się również głowica z wirującym czujnikiem pomiarowym napędzana pokrętkiem. Głowica ma możliwość przemieszczania się wzdłuż liny.



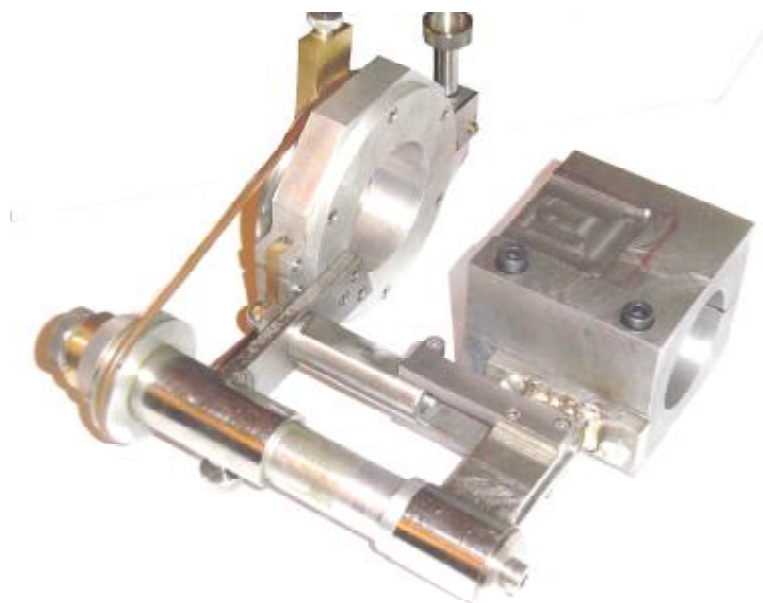
*Rys. 3 Głowica GPW (głowica pomiarowa z wirującym czujnikiem)*

Głowica pomiarowa wraz z inteligentnym przetwornikiem jest systemem mechatronicznym, złożonym z części mechanicznej, elektrycznej i elektronicznej, w którym wykorzystuje się nowoczesne technologie informatyczne. Opracowanie metody oceny stanu lin stalowych w ich zamocowaniach bez konieczności jakiegokolwiek demontażu obiektów technicznych poddawanych kontroli, wymagało skonstruowania i zbudowania obwodu magnetycznego o parametrach technicznych zapewniających odpowiednie właściwości metrologiczne urządzenia. Istotą działania tego urządzenia jest magnesowanie liny wraz z częścią stożka stałym polem magnetycznym. Czujnik pomiarowy wykorzystujący zjawisko indukcji magnetycznej lub efekt Halla [8], wykonuje ruch obrotowy względem osi liny, reagując na zmianę składowej radialnej indukcji magnetycznej, która jest funkcją miejscowej zmiany przekroju ferromagnetycznego liny. Głowica posiada możliwość regulacji odległości czujnika od krytycznego przekroju struktury oraz odległości od osi lub obwiedni liny. Sygnał z czujnika jest przekazywany do rejestratora sygnałów gdzie poddawany jest wzmocnieniu i dalszej obróbce.

W ramach realizacji projektu badawczo-rozwojowego zmieniano parametry konstrukcyjne urządzenia w celu poprawy jego parametrów metrologicznych. Poniżej przedstawiono poszczególne etapy modyfikacji urządzenia. Obwód magnetyczny utrzymuje się na linie dzięki magnesom trwałym. Montaż urządzenia jest prosty, natomiast demontaż bez dodatkowego oprzyrządowania jest niemożliwy. Na Rys. 4 pokazano zmodernizowane urządzenie z mechanizmem do zsuwania magnesów z nabiegownika (po lewej stronie model urządzenia, po prawej widok urządzenia).



**Rys. 4** Model i widok urządzenia z mechanizmem do demontażu obwodu magnetycznego  
W prototypowym urządzeniu wirujący czujnik był konstrukcyjnie spójny z nabiegunnikiem

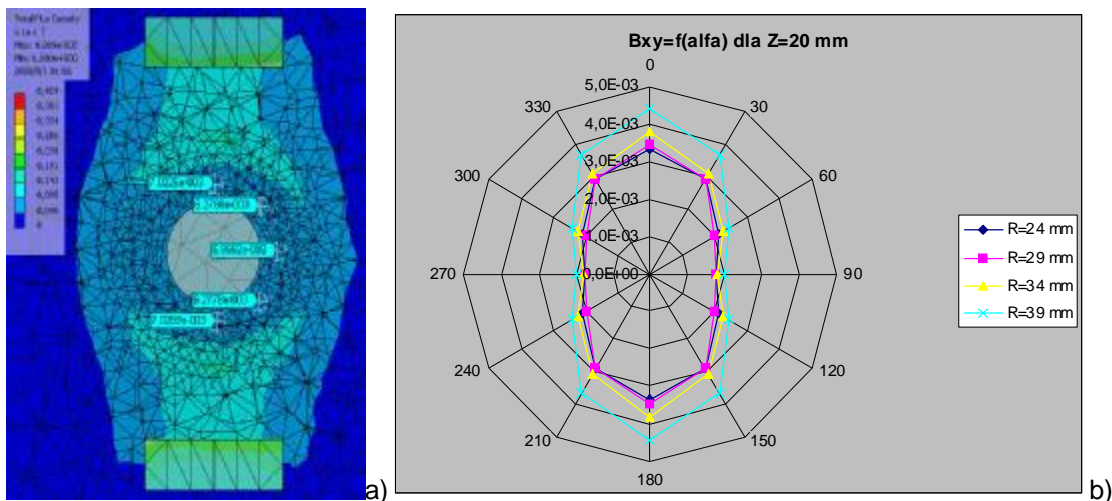


**Rys. 5** Widok czujnika obrotowego.

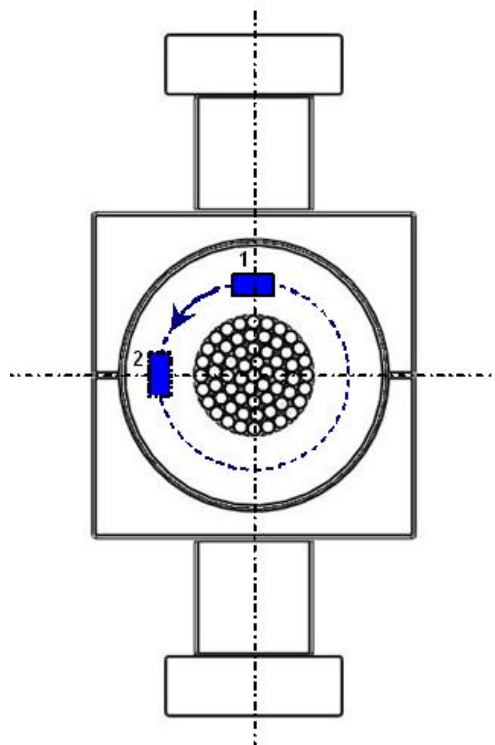
Prowadzone badania wykazały, że przy przyjęciu takiego rozwiązania uzyskujemy z czujnika pomiarowego sygnał informujący o niesymetrycznym rozkładzie magnetycznego pola rozproszenia wokół liny [9], co jest zjawiskiem niekorzystnym. Kolejna modernizacja związana była z rozdzieleniem czujnika obrotowego od nabiegunnika. W tym rozwiązaniu czujnik montowany jest bezpośrednio na lince.

Biorąc pod uwagę sposób dokonywania pomiaru, który jest zdominowany obrotowym ruchem czujnika, ważnym jest by wartości składowej promieniowej indukcji magnetycznej w każdym miejscu dokoła liny (na tym samym promieniu pomiarowym) były jednakowe. Głównym problemem przedstawionego rozwiązania konstrukcyjnego głowicy magnetycznej, jest asymetria rozkładu pola magnetycznego w jej wnętrzu (Rys. 6.), w płaszczyznach normalnych do osi liny w pobliżu wejścia liny do stożka. W związku z tym, przy założeniu, że pomiar dokonujemy na lince idealnej (pozbawionej wad w przekroju metalicznym), pomiar wykonany w punkcie nr 1 (Rys. 7) wykaże inną wartość składowej promieniowej indukcji magnetycznej, niż pomiar wykonany w punkcie nr 2, co jest efektem niepożądanym.



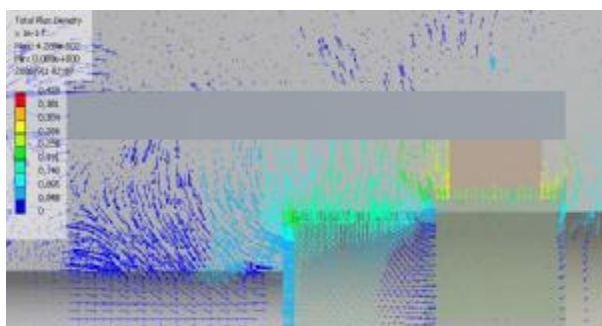


**Rys. 6** Asymetria rozkładu pola magnetycznego w płaszczyznach prostopadłych do osi liny dla głowicy z tradycyjnym obwodem magnetycznym (ze zworą) – a) wyniki graficzne obliczeń MES, b) wyniki numeryczne - wykres składowej promieniowej (radialnej) indukcji pola magnetycznego na różnych promieniach pomiarowych

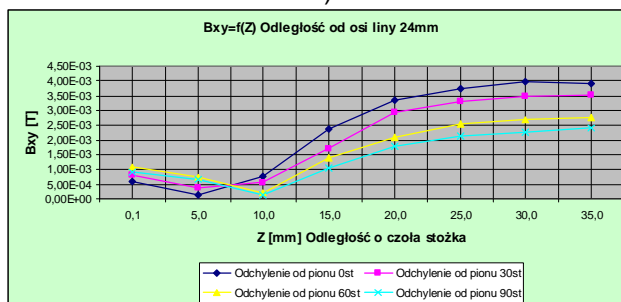


**Rys. 7** Obrotowy ruch czujnika wokół liny

Podobna sytuacja ma miejsce podczas dokonywania pomiarów dla kilku różnych odległości od płaszczyzny czołowej stożka. Dla pomiarów wykonanych w odległościach np.: 5, 10, 15 mm od przekroju krytycznego, otrzymamy różne wartości składowej promieniowej indukcji magnetycznej (Rys. 8). Biorąc pod uwagę fakt, że w założeniach wykluczaliśmy istnienie wad w przekrojach metalicznych liny, otrzymane wartości powinny być identyczne. Sytuacja ta potwierdza nieliniowy rozkład pola magnetycznego w funkcji odległości od miejsca wejścia liny w stożek.



a)

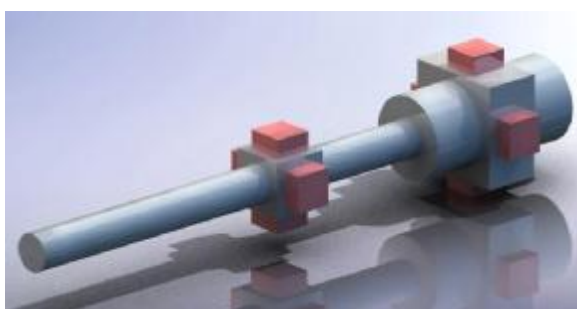


b)

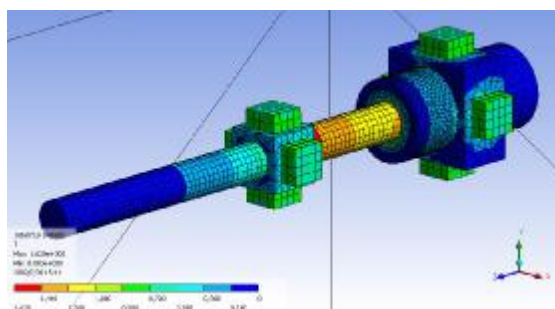
**Rys. 8** Nieliniowy rozkład pola magnetycznego wzdłuż linii – a) wyniki graficzne analizy MES, b) wykres składowej promieniowej indukcji magnetycznej (wartość mierzona) w funkcji odległości od przekroju krytycznego dla tego samego promienia pomiarowego, ale innych położań kątowych

Celem zminimalizowania wpływu asymetrii rozkładu pola magnetycznego na błędy pomiarowe w tradycyjnym obwodzie magnetycznym głowicy (ze zworą), zaproponowano i wykonano szereg analiz numerycznych 3D stanowiących elementy wielokryterialnej optymalizacji tego obwodu. Analizy te zostały przeprowadzone w oparciu o dotychczas zdobyte doświadczenia z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych oraz możliwości oprogramowania CAE (Computer Aided Engineering) ANSYS Workbench [10]. Dzięki takim działaniom określono w jaki sposób zmiana parametrów konstrukcyjnych będących jednocześnie zmiennymi decyzyjnymi optymalizacji, wpływa na każdą z funkcji celu tej optymalizacji, w tym m. in. na symetryczny rozkład pola magnetycznego.

W wyniku prowadzonych prac i szeregu eksperymentów numerycznych opracowano nową koncepcję urządzenia, którego właściwości metrologiczne zostały potwierdzone na drodze doświadczeń rzeczywistych i spełniają założenia postawione przez konstruktorów. W rozwiązaniu tym wyeliminowano zwory magnetyczne. (Rys. 9). Istnieje jednak problem z zapewnieniem odpowiednio wysokiej wartości indukcji magnetycznej umożliwiającej wysoką wykrywalność wad w cięgnach, aczkolwiek przy odpowiednio dobranej liczbie magnesów, ich wymiarach, jak również odpowiednim ich rozmieszczeniu oraz wzajemnych relacjach pomiędzy nabiegownikami – warunek ten jest możliwy do spełnienia.



a)



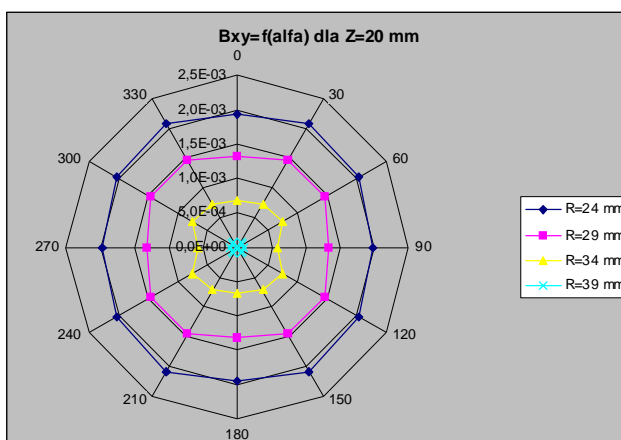
b)

**Rys. 9** Nowa konstrukcja głowicy (obwód bez zwory) – a) uproszczony model konstrukcji, b) graficzne wyniki analizy MES konturowe

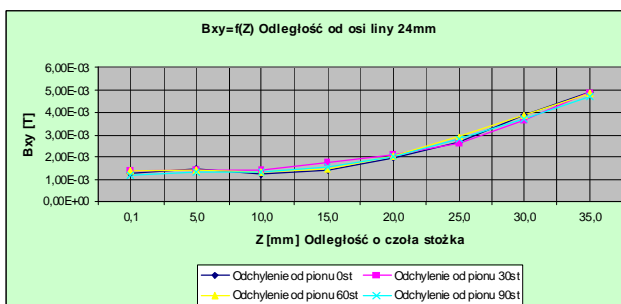
W odniesieniu do głowicy z tradycyjnym obwodem magnetycznym takie rozwiązanie posiada szereg zalet takich jak:

- znacznie obniżona masa urządzenia, co w trudnych warunkach pomiarowych ułatwia jego instalację na badanym obiekcie;

- równomierny rozkład składowej radialnej indukcji magnetycznej w przekroju prostopadłym do osi liny (Rys. 10) oraz wzdłuż osi liny w pobliżu przekroju krytycznego (Rys. 11) i związana z tym minimalizacja błędów pomiarowych;
- brak zwory, a tym samym eliminacja ogromnych sił spójności magnetycznej pochodzących od silnych magnesów trwałych – ułatwiony montaż i demontaż urządzenia.

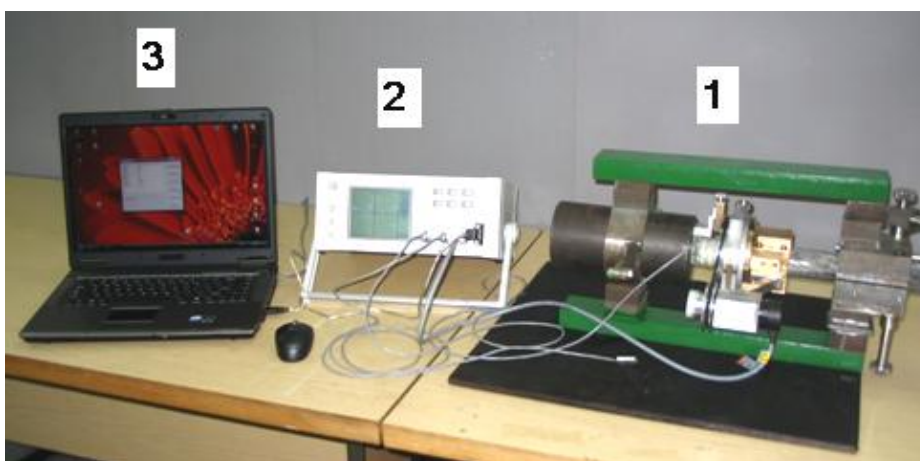


**Rys. 10** Wykres składowej j promieniowej (radialnej) indukcji pola magnetycznego na różnych promieniach pomiarowych dla nowej koncepcji urządzenia



**Rys. 11** Wykres składowej j promieniowej (radialnej) indukcji pola magnetycznego wzdłuż długości liny

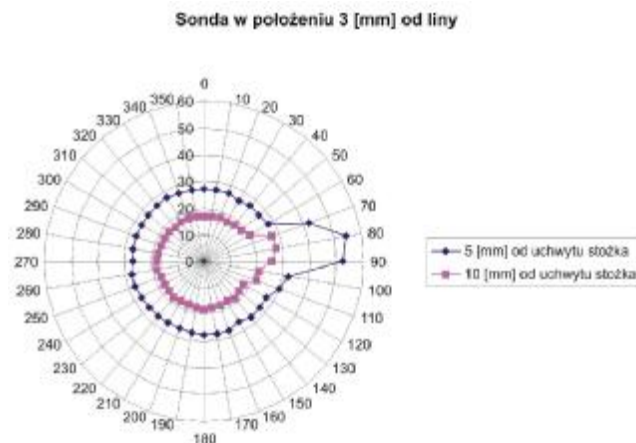
Prowadzone działania doprowadziły do zbudowania zestawu pomiarowego (Rys. 12) składającego się z głowicy z wirującym czujnikiem (wersja ze zworą) 1 oraz analizatora uszkodzeń 2 posiadającego możliwość podłączenia komputera 3.



**Rys. 12** Widok zestawu pomiarowego

Przykładowe wyniki uzyskane na drodze rzeczywistych pomiarów struktury lina – stożek z zamodelowanym uszkodzeniem, przedstawiono w biegunowym układzie współrzędnych (Rys. 13).





**Rys. 13** Zarejestrowany sygnał z czujnika pomiarowego

Miernikiem zużycia liny jest „szerokość” sygnału, rejestrowanego podczas badań za pomocą rejestratora defektografu MD 120 /na przykład/ lub za pomocą specjalnej przystawki elektronicznej kondycjonującej wyniki i przedstawiające je w postaci wykresu biegunowego na ekranie LCD albo wykreślonego za pomocą komputera i programu Excel.

### 3. Podsumowanie

Wyniki uzyskane podczas wykonywania prac badawczych, pozwalają na sformułowanie stwierdzenia, że jest możliwy pomiar stanu lin w pobliżu ich zakończeń przy stożkach za pomocą opracowanej metody i urządzenia, którego prototyp wykorzystano w pracach badawczych. Za pomocą opracowanej metody jest możliwe wykrycie pęknięć drutów znajdujących się we wszystkich warstwach liny z wyjątkiem drutu usytuowanego w osi liny.

W ramach projektu wykonano wiele badań laboratoryjnych, w których wykorzystano wykonane w laboratorium zakończenia lin w stożkach, na których modelowano pęknięcia za pomocą nacinania drutów. Należy wspomnieć, że przyjęty sposób modelowania okazał się być najbardziej skutecznym i miarodajnym, ale niestety także pracochłonnym, ponieważ wykonane modele były modelami jednorazowego użytku.

Wynikiem przeprowadzonych pomiarów przy wykorzystaniu pełnego zestawu pomiarowego jest informacja jakościowo-ilościowa, pozwalająca na stwierdzenie występowania pękniętych drutów w pobliżu wejścia liny do stożka. Zostaje ona uzyskana i zarchiwizowana dzięki zastosowaniu komputera wraz z odpowiednim oprogramowaniem.

Funkcjonalność urządzenia została potwierdzona pełnym cyklem badań wykonanym dla różnych typów i rodzajów uszkodzeń. Dało to kompleksowy obraz możliwości diagnostycznych urządzenia do badania zakończeń lin, weryfikując przyjęte założenia konstrukcyjne i metrologiczne aparatury.

### Literatura:

- [1] J. Kwaśniewski: *Prezentacja urządzenia do miejscowego badania lin stalowych* na XIII Sympozjum Naukowo-Technicznym Kraków 2002.
- [2] Sz. Pałkowski: *Konstrukcje stalowe* PWN W-wa 2001.
- [3] A. Tytko, M. Koszyk: *Nieniszczące metody oceny zakończeń lin stalowych*. Zeszyty Naukowo Techniczne KTL Nr 29 Kraków 2002.
- [4] Zgłoszenie patentowe P-351420 J.Hansel, J. Kwaśniewski, L.Lankosz *Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych*. Kraków 2001.
- [5] Beňo, J.: *Teória rezania kovov*. (1999) Košice, Vydavateľstvo Vienaľa, 256 s.
- [6] Schmidt, K. et al.: *Eckfräsen mit Mendeschneidplatten-Werkzeugen - Mathematische - geometrische Untersuchungen*. (2006), In.: *Production Process in Mechanical Engineering – Research Reports*, Krakow – Košice, pp. 107-112.
- [7] Kwaśniewski J. : „Zastosowanie wybranych metod analizy sygnału niestacjonarnego w diagnozowaniu lin i rur stalowych”, *Studia Rozprawy Monografie* Nr 86, Wydawnictwo IGSMiE, PAN, Kraków 2001r.
- [8] Szabó, O.: *Microfinishing of Polygon Surfaces*. (1996), In.: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Development of Metal Cutting*, Košice, pp. 16-20.
- [9] Moaveni S., *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS.*, 2008.

**Recenzia/Review:** Ing. Janka Šaderová, PhD.