



## TECHNICAL DIAGNOSTICS OF COMPACTED ROPES

## DIAGNOSTYKA TECHNICZNA LIN KOMPAKTOWANYCH

JERZY KWAŚNIEWSKI<sup>1</sup>, SZYMON MOLSKI<sup>2</sup>, HUBERT RUTA<sup>3</sup>, TOMASZ KRAKOWSKI<sup>4</sup>

**Key words:** wire rope, magnetic testing, diagnostic.

**Abstract:** Introduction of new design solutions for steel wire ropes (compacted ropes) requires manufacturers of measuring equipment of a comprehensive approach to how to assess their condition. This article analyzes and evaluation of issues relating to the metrological characteristics of the test equipment, analysis of failures and describes the parameters measurement capabilities including the preparation and analysis of wavelet signal processing.

**Kľúčové slová:** lano, magnetické testovanie, diagnostika

**Abstrakt:** Wprowadzanie do eksploatacji nowych rozwiązań konstrukcyjnych lin stalowych (lin kompaktowanych) wymaga od konstruktorów aparatury pomiarowej kompleksowego podejścia do sposobu oceny ich stanu technicznego. W artykule dokonano analizy i oceny zagadnień dotyczących właściwości metrologicznych zastosowanej aparatury pomiarowej, analizy parametrów uszkodzeń oraz opisano możliwości pomiarowe z uwzględnieniem preparatyki i analizy falkowej sygnału pomiarowego.

### 1 WSTĘP

Liny kompaktowane cieszą się coraz większą popularnością zwłaszcza w urządzeniach szybowych (Tab.1.), na platformach wiertniczych, instalacjach morskich i innych urządzeniach transportu linowego. Ich utworzenie możliwe jest dzięki zastosowaniu procesu mechanicznego ściskania w kierunku promieniowym. W wyniku odkształcenia plastycznego splotki o liniowym styku drutów tworzą styk powierzchniowy. Dzięki takiej technologii możliwe jest uzyskanie gniotu w przedziale od 6 do 30%. Ponadto uzyskuje się duże wartości współczynnika wypełnienia przekroju, co odbija się na znacznym zmniejszeniu średnicy liny. W przypadku, gdy splotki wykonywane są w tym samym procesie technologicznym, w którym następuje wyrównanie naprężeń w poszczególnych warstwach i splotkach trwałość zmęczeniowa wzrasta nawet o 50% w porównaniu do lin powszechnie stosowanych. Wytrzymałość wzdłużna wzrasta o około 10%. Niepożądaną cechą

<sup>1</sup> **Dr hab. inż. Jerzy Kwaśniewski prof. nazw AGH** Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Stasica w Krakowie, al. Mickiewicza 30 30-059 Kraków, Katedra Transportu Linowego, Tel.: 12 617-23-13, 12 634-35-37, Fax 12 636-01-44 e-mail: kwasniew@imir.agh.edu.pl

<sup>2</sup> **Dr inż. Szymon Molski** Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Stasica w Krakowie al. Mickiewicza 30 30-059 Kraków, Katedra Transportu Linowego, Tel.: 12 617-23-13, 12 634-35-37, Fax 12 636-01-44 e-mail: molski@imir.agh.edu.pl

<sup>3</sup> **Mgr inż. Hubert Ruta** Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Stasica w Krakowie al. Mickiewicza 30 30-059 Kraków, Katedra Transportu Linowego, Tel.: 12 617-33-59, 12 634-35-37, Fax 12 636-01-44 e-mail: hubert.ruta@agh.edu.pl

<sup>4</sup> **Mgr inż. Tomasz Krakowski** Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Stasica w Krakowie al. Mickiewicza 30 30-059 Kraków, Katedra Transportu Linowego, Tel.: 12 617-33-59, 12 634-35-37, Fax 12 636-01-44 e-mail: krakowsk@agh.edu.pl

jest nietypowy proces zmęczenia. Objawia się on szybkim wzrostem pękniętych drutów po długim okresie eksploatacji bez pojawiania się złomów zmęczeniowych.

Zalety lin kompaktowanych:

- większa siła zrywająca przy zmniejszonej średnicy zewnętrznej
- zwiększona elastyczność
- większa żywotność wynikająca z grubszych drutów i uszczelnienia zewnętrznej
- powierzchni liny
- większa odporność na korozję i tarcia powierzchniowe
- lepsza praca na bębnach
- mniejsza podatność na wydłużanie

**Tabela 1.** Liny kompaktowane stosowane w Polskim górnictwie (wybrane)

Lp.	Użytkownik liny	Rodzaj liny	Uwagi
1	SRK S.A. CZOK ruch Siemianowice # Ewa	56 6xK36 WS 1670	Bridon
2	Kopex – PBSz S.A. KWK „Budryk” # II	25 34(W)xk7 (34 LR)	Bridon
3	Kopex – PBSz S.A. KWK „Zofiówka” # I - Bzie	42 34(W)xk7	Bridon
4	PRG ROW – JAS	41 16xk7	Teufelberger
5	PRG ROW – JAS	40 16xk7	Teufelberger
6	KWK „Pniówek”	52 6xK36 WS	Teufelberger
7	KWK „Rydułtowy-Anna” – ruch Rydułtowy	62 6xK36 WS	Bridon

## 2 ANALIZA CZYNNIKÓW DECYDUJĄCYCH O EFEKTYWNOŚCI PROCESU DIAGNOSTYCZNEGO LIN KOMPAKTOWANYCH

Kompleksowe rozwiązanie problemu z diagnozowaniem lin kompaktowanych wymaga dokonania analizy i oceny:

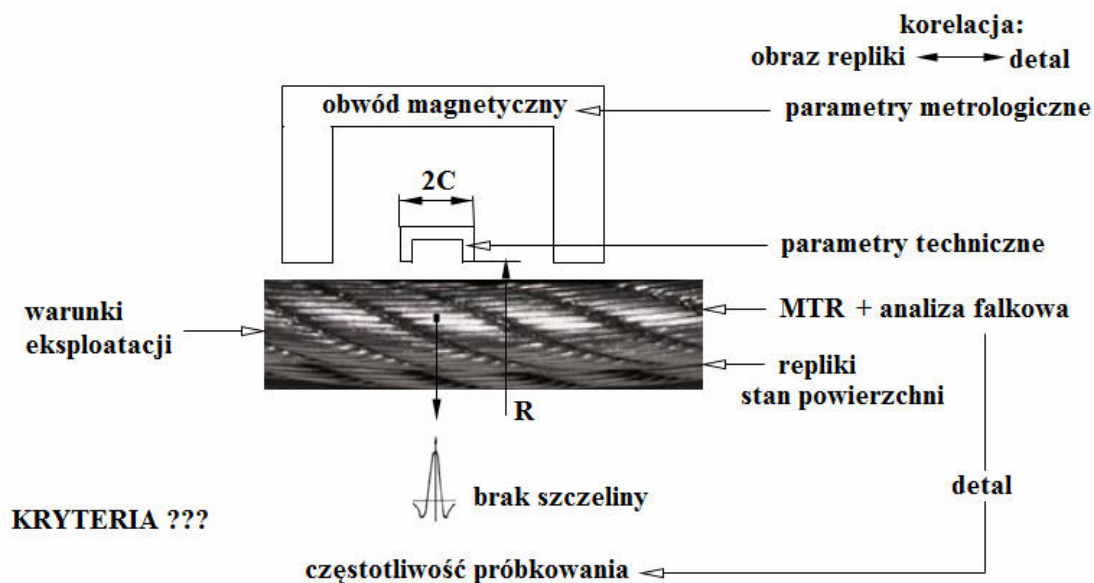
- zagadnień natury metrologicznej w odniesieniu do zastosowanej aparatury pomiarowej oraz
- wiedzy dotyczącej warunków pracy z uwzględnieniem czynników wpływających na ich zużycie.

O warunkach pracy lin kompaktowanych najwięcej informacji mają użytkownicy tych lin, jednak przepływ informacji o zachodzących w nich procesach zużyciowych jest dość ograniczony. W artykule przeanalizowano w punkcie 4 aspekty metrologiczne mające wpływ na opracowywaną specjalnie dla lin kompaktowanych aparaturę pomiarową. Uwarunkowania metrologiczne dotyczą:

- - parametrów uszkodzeń (cechy stanu) czyli pęknięć drutów o bardzo małych szczelinach, stanu powierzchni lin bezpośrednio po kompaktowaniu i po wybranym okresie eksploatacji,
- - właściwości metrologicznych związanych z częstotliwością rejestracji sygnałów, stopniem namagnesowania liny, parametrami technicznymi zastosowanych czujników, zdefiniowanymi symptomami zużycia.

W punkcie 3 zamieszczono wybrane repliki z powierzchni badanych lin kompaktowanych (nowych i eksploatowanych). Wykorzystanie analizy matematycznej wyższego rzędu do analizy sygnałów niestacjonarnych jest przedmiotem punktu 5 referatu. Wykorzystanie analizy falkowej wymaga jednak innego podejścia do defektoskopii magnetycznej lin kompaktowanych. Ta analiza pozwala na określenie symptomów zużycia, jednak należy poszukiwać metody na ilościową ocenę zmian zużyciowych na podstawie analizy detali dekompozycji niosących informację o zużyciu. Ponadto dla tych lin powinny zostać opracowane specjalne kryteria odkładnia.

Na rysunku 1 przedstawiono najważniejsze czynniki decydujące o efektywności procesu diagnostycznego lin kompaktowanych.



Rys.1. Czynniki wpływające na efektywność oceny stanu technicznego lin kompaktowanych.

### 3 PREPARATYKA LIN KOMPACTOWANYCH

Zaawansowana technika badań nieniszczących wykorzystująca preparatykę (czyli wykonanie repliki) otwiera pole do szerokich zastosowań w inspekcji inżynierskiej i metrologii, głównie zaś w zaawansowanym przemyśle inżynierskim, jak energetyka, przemysł kosmiczny i chemiczny czy w przemyśle wydobywczym. Można ją również wykorzystać do nieniszczących badań powierzchniowych drutów stalowych lin kompaktowanych.

W zależności od rodzaju preparatu w mikroskopii prześwietleniowej wyróżnia się dwa podstawowe sposoby badań struktury:

- bezpośredni polegający na wprowadzeniu do mikroskopu elektronowego wprost badanego materiału w postaci cienkich folii metalicznych, drobno dyspersyjnych proszków lub cienkich warstw.
- pośredni, tj. badaniu replik stanowiących najczęściej odwzorowanie powierzchni preparatu co było zastosowane do powierzchni lin kompaktowanych.

Metodę pośrednią można z kolei podzielić na:

Repliki jednostopniowe, które otrzymuje się przez nałożenie cienkiej warstwy masy plastycznej na powierzchnię próbki i jej oderwanie od próbki (rys.2.).



Rys.2. Sposób wykonania replik jednostopniowych. [11]

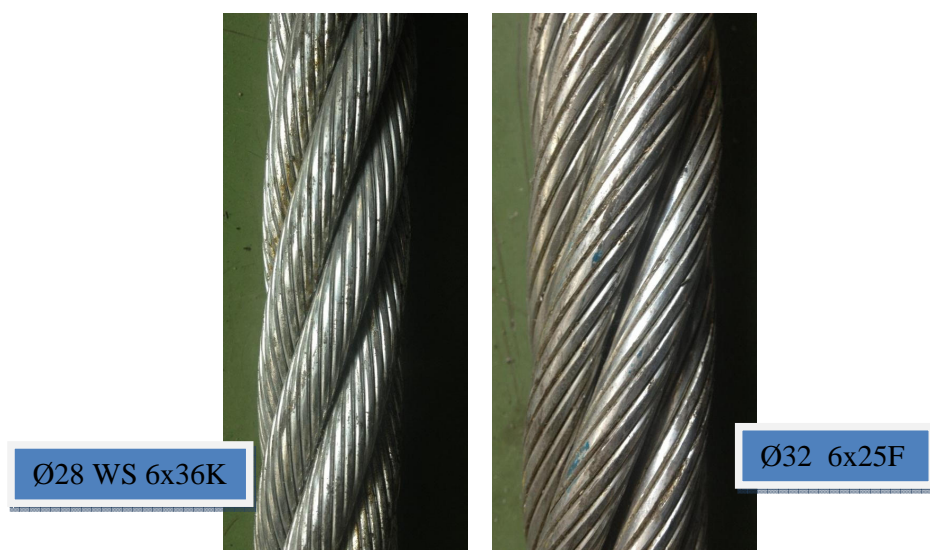
Repliki dwustopniowe (matrycowe), które pozwalają na badanie topografii (konfiguracja powierzchni uwzględniająca jej kształt oraz obecność i wzajemne położenie obiektów i punktów charakterystycznych) powierzchni próbek bez jej niszczenia oraz badaniu faktograficznym.

Zaletą replik jest możliwość zdjęcia odcisku ze zglądu (jest to pobrana skośnie, poprzecznie lub podłużnie względem osi materiału i odpowiednio przygotowana próbka do badań mikroskopowych) bez konieczności jego niszczenia, lub wykonanie odcisku miejscowego zglądu wykonanego na dużym przedmiocie. Wadą natomiast jest nieco bardziej złożona preparatyka oraz mniejsza osiągnięta zdolność rozdzielcza. Najczęściej wykonywane są repliki dwustopniowe: triafol-węgiel. Odwzorowanie topografii powierzchni wytrawionych próbek wykonuje się poprzez nałożenie triafolu zwilżonego w rozpuszczalniku i po odparowaniu rozpuszczalnika odrywa od powierzchni próbki, a naparowanie matrycy przeprowadza się w specjalnych urządzeniach (napylarki).

Uzyskana podczas badania replika powinna:

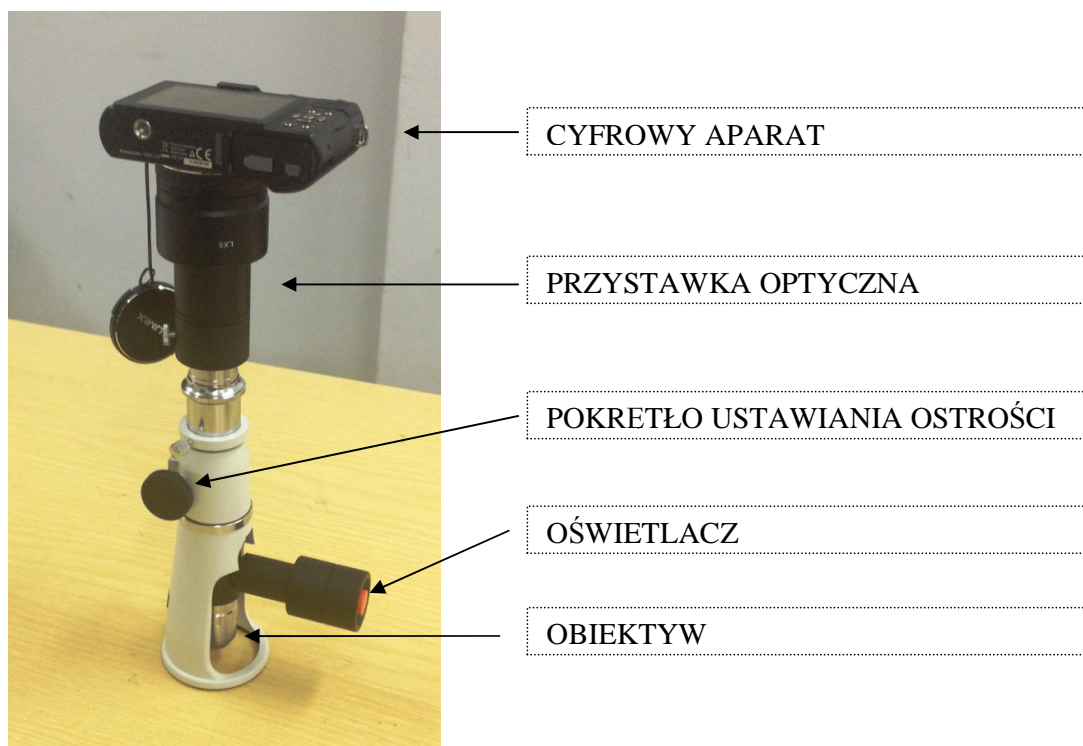
- dokładnie odwzorowywać powierzchnię próbki,
- posiadać dobrą wytrzymałością mechaniczną,
- być bezpostaciowa,
- łatwo oddzielać się od powierzchni badanej próbki,
- posiadać dobrą rozdzielczość,
- być kontrastową i łatwą do interpretacji podczas obserwacji.

W Katedrze Transportu Linowego wykonano repliki jednostopniowe z powierzchni dwóch lin kompaktowanych: Ø28 WS 6x36K 1770 oraz Ø32 6x25F Filler (rys.3). Lina Warrington Seale jest linią która jeszcze nie pracowała, natomiast lina o konstrukcji Fillera jest linią zdjętą z obiektu, na którym była eksploatowana.



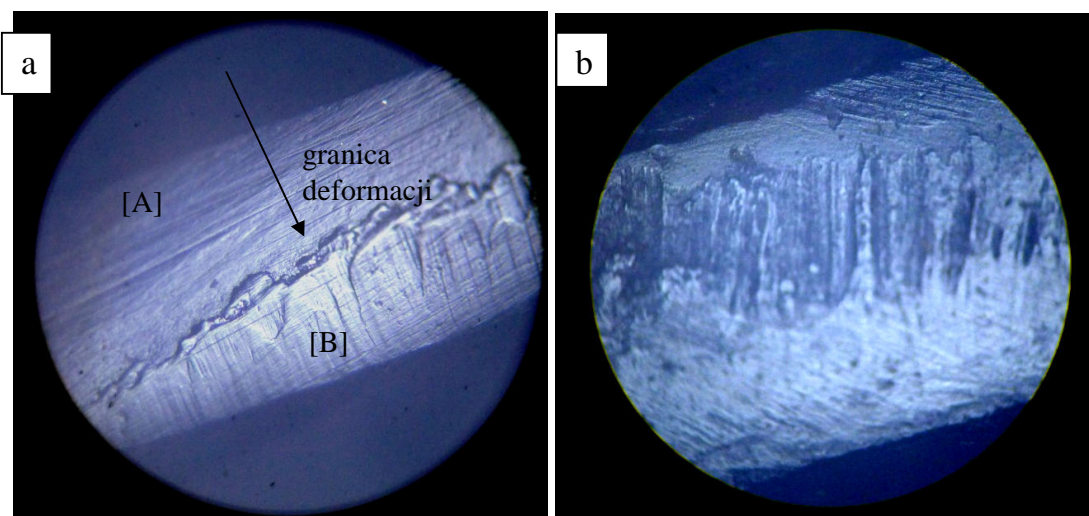
**Rys.3.** Modele lin z których zdjęto repliki

Uzyskane w ten sposób repliki obserwowano pod mikroskopem optycznym w powiększeniu 100 i 400 krotnym. Zestaw do badań nieniszczących pozwala również na archiwizację otrzymanych obrazów poprzez wykonanie zdjęć. W tym celu w miejsce okularu mikroskopu, dzięki specjalnej przystawce optycznej montuje się cyfrowy aparat fotograficzny. W tak skompletowanym zestawie uzyskujemy jednak mniejsze powiększenie optyczne: 80 i 320 krotne (rys.4.). Należy też pamiętać aby aparat fotograficzny nie miał ustawionej funkcji zbliżenia cyfrowego.



**Rys.4.** Mikroskop z aparatem cyfrowym.

Na rysunku 5 przedstawiono zdjęcia replik z badania ciągła nowego i po wykonaniu określonej ilości cykli pracy. Zdjęcia wykonano aparatem fotograficznym przy powiększeniu 80-cio krotnym.

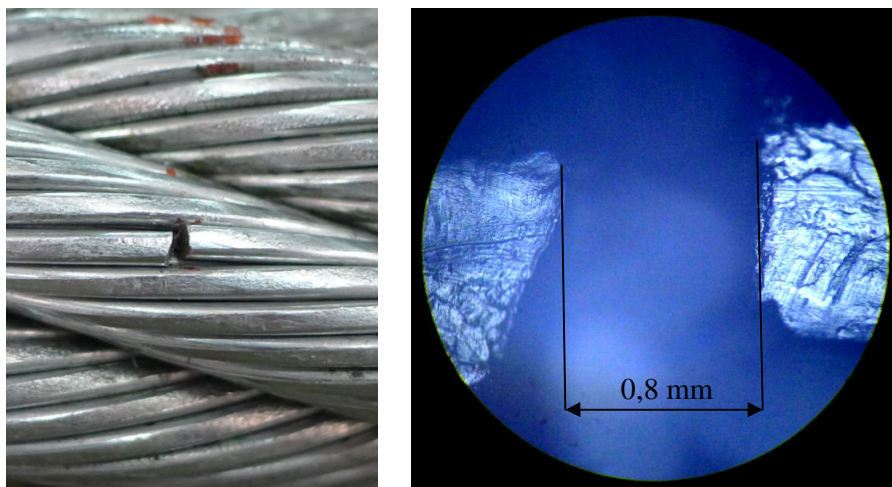


**Rys.5.** Zdjęcia wykonanych replik dla: a – liny nowej; b – liny eksploatowanej

Rysunek 5.a prezentuje replikę powierzchni drutu liny nowej [A]. Wyraźnie widać granicę powstałą na powierzchni drutu w skutek deformacji. Pozostała część drutu nie wykazuje oznak zużycia. Natomiast drut na rysunku 5.b posiada na swojej powierzchni szereg małych prostopadłych rys i deformacji które powstały w wyniku jego pracy. Te rysy i deformacje na skutek ciągłej pracy liny mogą z czasem doprowadzić do pęknięcia drutu. Przykładowe uszkodzenie w postaci pękniętego drutu



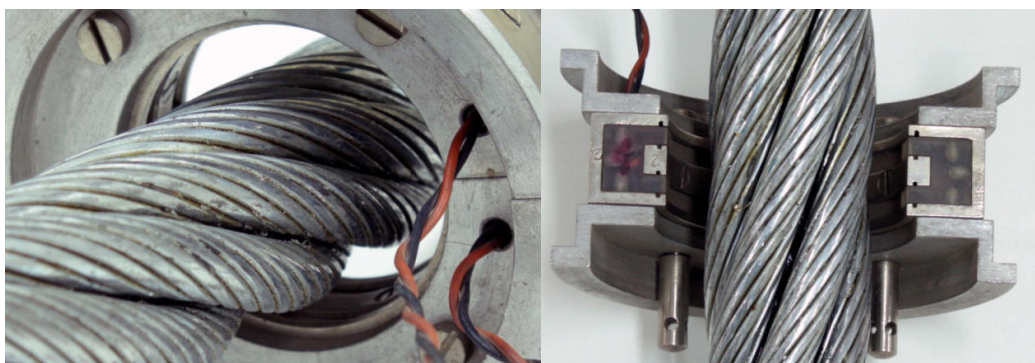
o szczelinie około 0,8mm oraz jego replika zamieszczona została na rysunku 6.



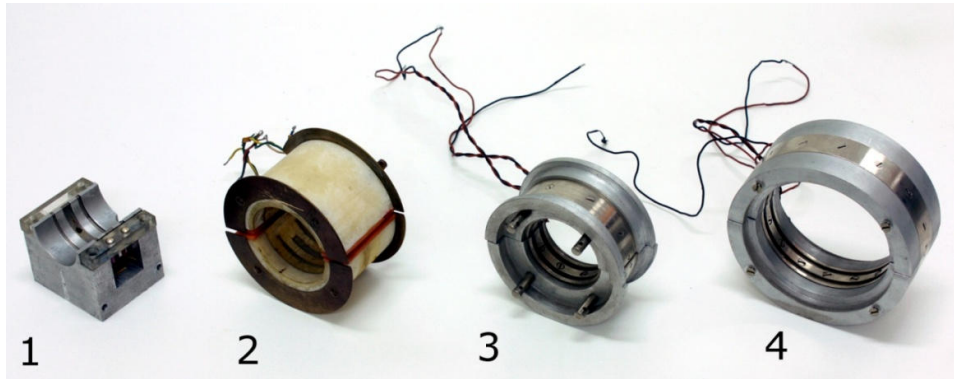
Rys. 6. Zdjęcie uszkodzenia drutu oraz widok repliki tego miejsca.

#### 4 WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE STOSOWANEJ APARATURY POMIAROWEJ W DEFEKTOSKOPII MAGNETYCZNEJ

W skład aparatury pomiarowej do defektoskopii magnetycznej lin stalowych wchodzi głowica pomiarowa oraz rejestrator sygnału. Parametry metrologiczne głowic, konstrukcyjne czujników oraz właściwości rejestratorów wpływają na efektywność metody analizy sygnałów. Czujniki indukcyjne stosowane w głowicach pomiarowych charakteryzują wymiary geometryczne takie jak  $R$  – promień czujnika oraz  $2C$  – szerokość czujnika (rys.7.). Ich optymalny dobór względem badanej liny umożliwia uzyskanie informacji o różnego rodzaju uszkodzeniach, nie tylko typu skokowego, ale również o korozji i starciach. W przypadku lin kompaktowanych poprawny dobór czujnika, zastosowanego w głowicy o odpowiednich właściwościach metrologicznych, w połączeniu z odpowiednim rejestratorem oraz właściwą analizą sygnału diagnostycznego, pozwala na prawidłową ocenę stanu technicznego badanej struktury. Na rysunku 8 pokazano modele czujników, które stosowane są w defektoskopii magnetycznej.

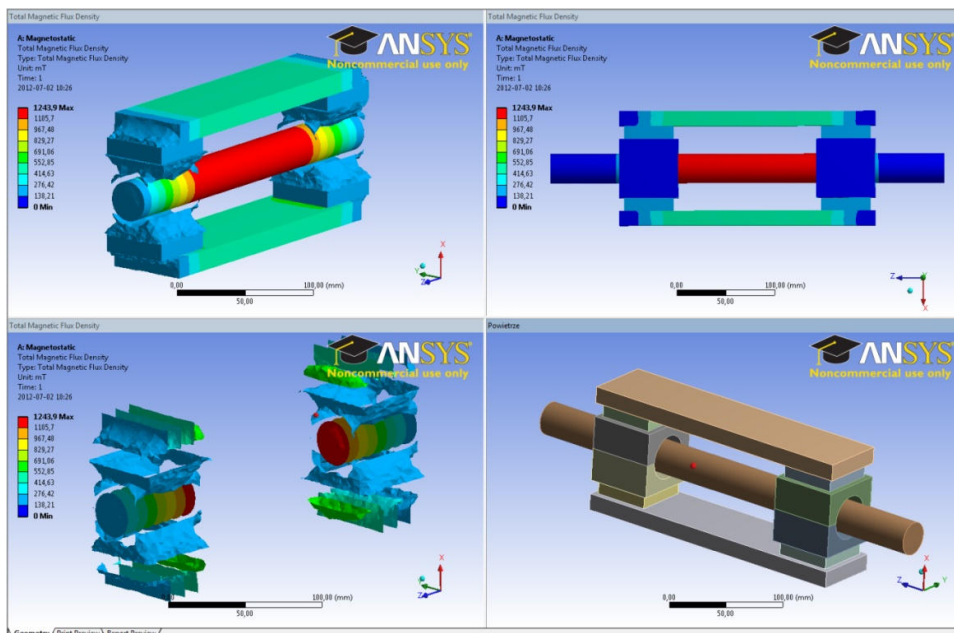


Rys. 7. Budowa czujnika indukcyjnego.

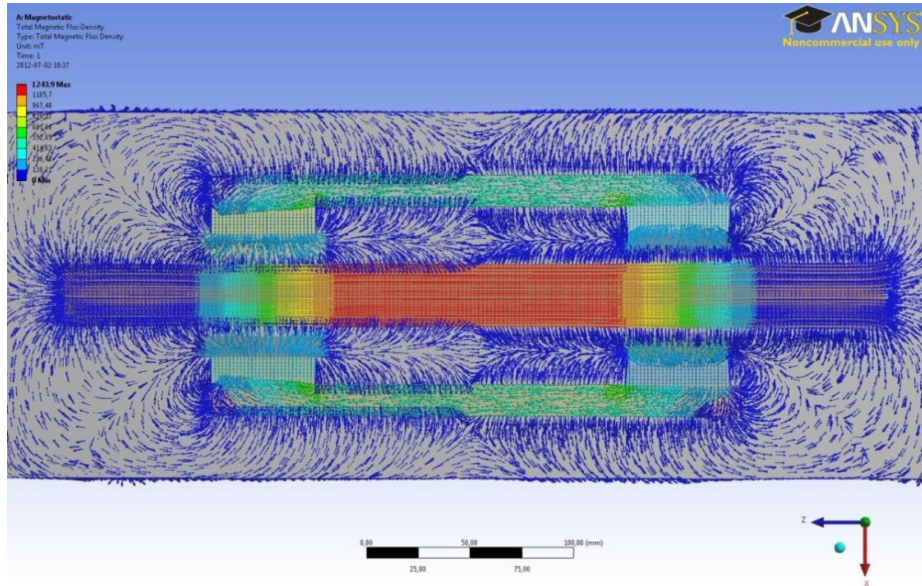


**Rys.8.** Modele czujników indukcyjnych (1,3,4-czujnik z rdzeniem ferromagnetycznym; 2-czujnik z podwójną cewką tzw. „czujnik siodłowy”)

Przy analizie falkowej należy uzyskać większą rozdzielczość w odwzorowaniu szczegółów rozkładu pola rozproszenia. Wiąże się to z potrzebą doboru właściwych czujników pomiarowych oraz optymalizacją stosowanych w głowicach obwodów magnetycznych. Biorąc pod uwagę konieczność dobrego odwzorowania pola rozproszenia w sygnale wynikającą z praktycznie niewidocznych szczelin zużyciowych, należy namagnesować badaną linię do odpowiednio wysokiego poziomu indukcji magnetycznej. Zbyt duży poziom indukcji w linii (bliski nasyceniu) jako parametr metrologiczny może doprowadzić do upływu strumienia magnetycznego do otoczenia i jednocześnie przyczynić się do zaburzeń pola rozproszenia pochodzącego od uszkodzeń. Nie bez znaczenia są także parametry funkcjonalne takie jak masa i gabaryty głowicy magnetycznej. Odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych (wymiary geometryczne, parametry materiałowe) magnesów trwałych będących źródłem stałego pola magnetycznego oraz pozostałych elementów magnetowodu, wiąże się z koniecznością przeprowadzenia wielokryterialnej parametrycznej optymalizacji głównie pod kątem własności metrologicznych urządzenia. Dzięki możliwością dostępnego na rynku oprogramowania typu CAE – ANSYS Workbench wykorzystującego MES w analizie rozkładów pól magnetycznych (rys.9, rys.10), możliwe jest zaprojektowanie obwodu magnetycznego dla danego bardzo wąskiego zakresu średnic linii. Nie należy traktować tego typu głowic jako urządzeń w pełni uniwersalnych ze względu na brak możliwości regulacji parametrów metrologicznych.

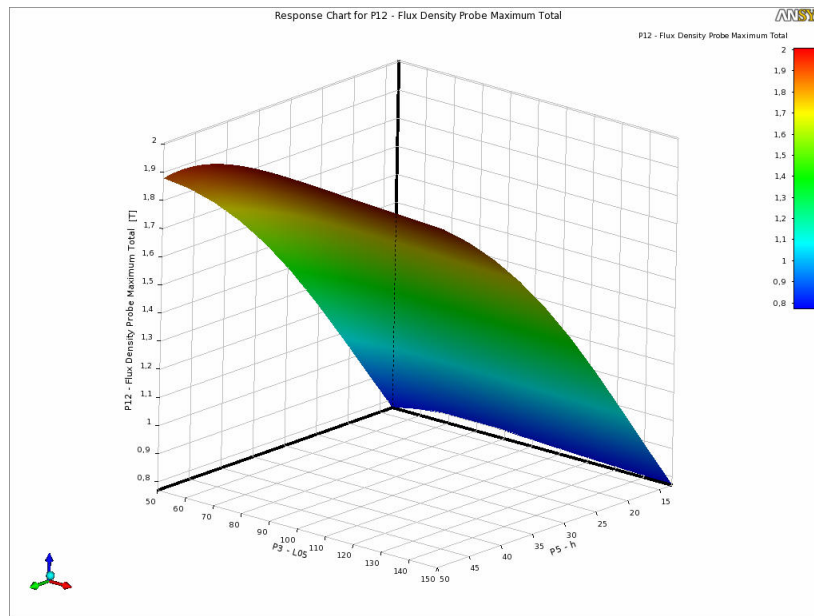


**Rys. 9.** Graficzna prezentacja wybranych rozkładów pola magnetycznego z wykorzystaniem MES (optymalizacja konstrukcji obwodu magnetycznego)



**Rys. 10.** Wektorowa prezentacja rozkładu indukcji w obwodzie magnetycznym i jego otoczeniu dla wybranych parametrów konstrukcyjnych

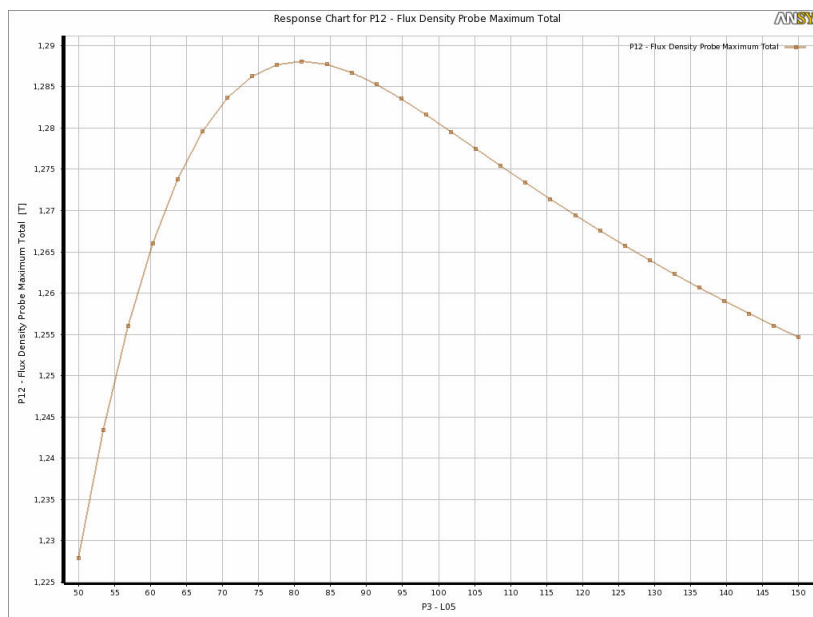
Główną funkcją celu optymalizacji magnetowodu jest indukcja w badanej linii, której wartość powinna znaleźć się na poziomie ok 1,3 – 1,6 T. Celem przeanalizowania wpływu wybranych zmiennych parametrów geometrycznych na funkcję celu przyjęto pewien zakres zmienności, np.: L – długość zwory (100mm - 300mm), h – wysokość magnesu (13mm – 50 mm) itp.(rys. 11).



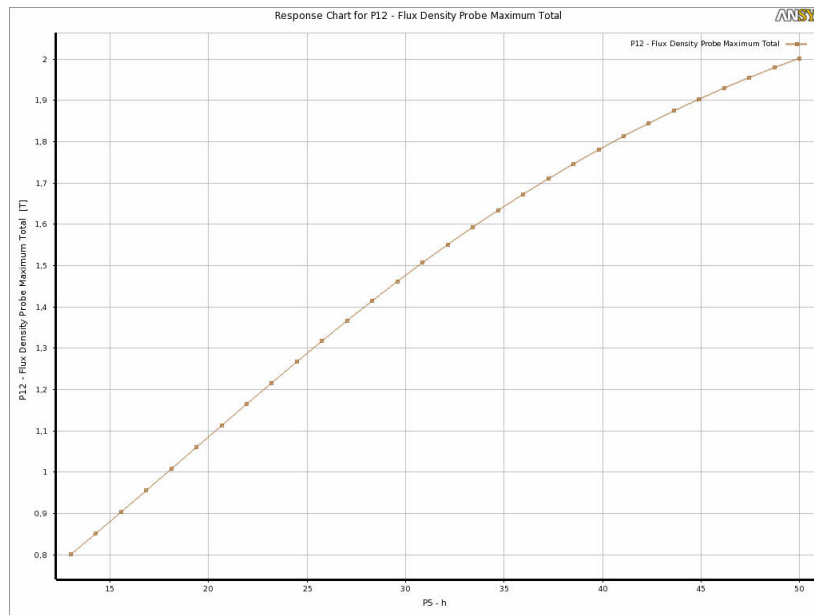
**Rys. 11.** Wartość indukcji w linii w funkcji dwóch zmiennych parametrów wielokryterialnej optymalizacji obwodu magnetycznego (h- wysokość magnesu, L05-połowa długości zwory)



Na rysunku 12 zaprezentowano wpływ długości zwory na indukcję w badanej linii przy założeniu że magnes będzie miał wysokość  $h = 25\text{mm}$  i przekrój poprzeczny kwadratu o wymiarach  $50 \times 50\text{ mm}$ . Przyjmując długość zwory na poziomie  $160\text{mm}$  (czyli parametr  $L05 = \text{połowa dł. zwory} = 80\text{mm}$ ), możemy wyznaczyć również wpływ wysokości zwory na wartość indukcji w linii (rys.13). Widać wyraźnie że przy takich założeniach by uzyskać odpowiednią wartość indukcji należy przyjąć magnes o wysokości  $h=28\text{-}33\text{mm}$ . Są to wyniki dla z góry narzuconych pozostałych parametrów konstrukcyjnych obwodu magnetycznego. Analogiczne analizy wpływu na funkcję celu można przeprowadzać dla pozostałych zmiennych decyzyjnych optymalizacji w założonych przedziałach zmienności. Działania takie powodują eliminację przypadkowości w doborze parametrów konstrukcyjnych urządzeń diagnostycznych dla lin kompaktowanych, co w końcowym rozrachunku przekłada się na efektywność i dokładność samego procesu diagnozowania i oceny stanu technicznego tych struktur.

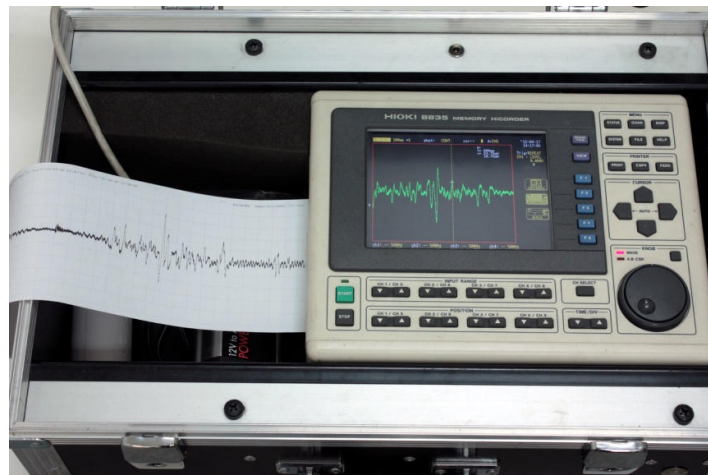


**Rys. 12.** Wartość indukcji w linii w funkcji połowy długości zwory dla wysokości magnesu  $h=25\text{ mm}$

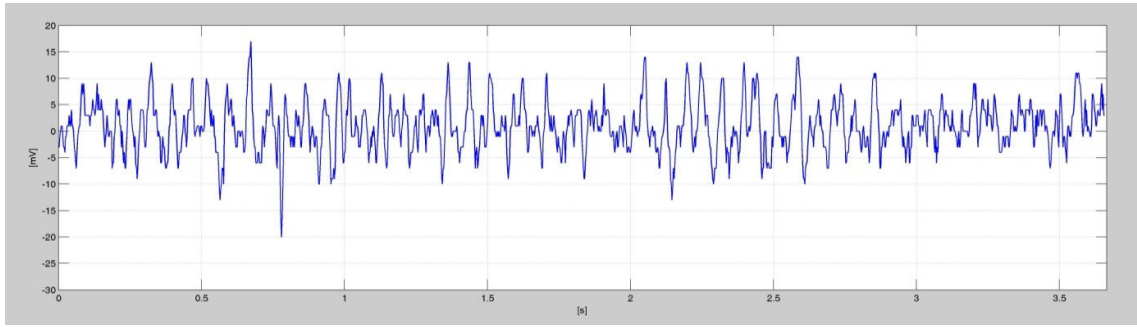


**Rys. 13.** Wartość indukcji w linii w funkcji wysokości magnesu dla długości zwory 160 mm (czyli  $L_{05}=80\text{mm}$ )

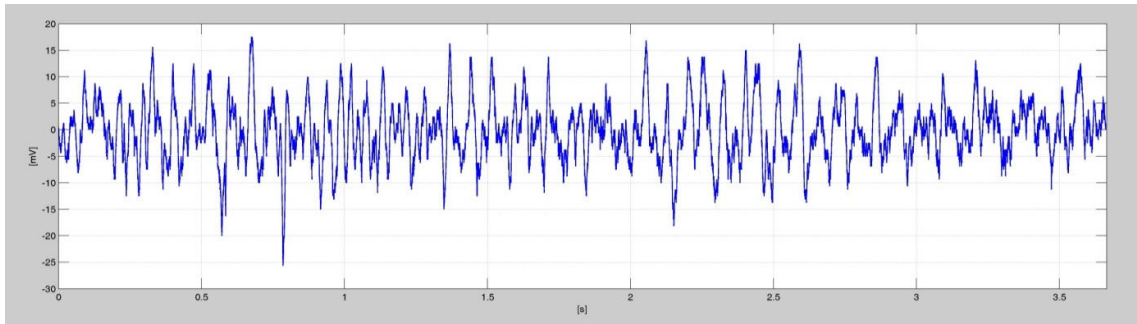
Stosowane powszechnie defektografy MD120 nie zapewniają optymalnej częstotliwości próbkowania (400 Hz), z tego powodu istnieje potrzeba zastosowania rejestratorów o odpowiednich parametrach np. rejestratora HIOKI 8835 (rys.14) umożliwiającego zapis z częstotliwością 10 000 Hz. Ponadto defektograf MD120 w porównaniu z HIOKI posiada niską impedancję wejściową powodujące zmniejszenia amplitudy rejestrowanego sygnału. Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono zapis sygnału z obydwu rejestratorów dla tego samego odcinaka badanej linii.



**Rys. 14.** Rejestrator analogowy HIOKI 8835



Rys. 15. Zapis z defektografu MD120



Rys. 16. Zapis z rejestratora HIOKI 8835

### 5 ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA SYGNAŁÓW NIESTACJONARNYCH (FALKI)

Obliczenie aktualnego poziomu zużycia na podstawie sygnału z czujnika indukcyjnego wymaga dużej wiedzy specjalistów diagnostyków związanej z określeniem zmian spowodowanych pęknięciami, starciami drutów i korozją. Zmiany te są w sygnale niejednokrotnie maskowane przez składową sygnału pochodzącego od konstrukcji liny. Można te zmiany wyselekcjonować przez zastosowanie analizy falkowej tego niestacjonarnego sygnału pomiarowego (Kwaśniewski J., 2000, Kwaśniewski J., Lankosz L., Zawada K., 1999).

Równanie definicyjne dyskretnej transformaty falkowej ( $j$ -dyskretna wartość skali,  $k$ -dyskretna wartość przesunięcia,  $j, k \in \mathbb{Z}$ ) ma postać [1]:

$$DWT_s(j, k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} s(n) \cdot \Psi_j^*(n - 2^j k) \quad (1)$$

gdzie:  $\Psi_j^*(n - 2^j k)$  - dyskretny odpowiednik ciągłej funkcji analizującej,  
 $*$  - spłot sygnału  $s(n)$  z funkcją analizującą.

Diadyczne falkowe przekształcenie sygnału (Białasiewicz J. 2000)  $s(n)$  generuje jego dekompozycję na dyskretnych poziomach rozdzielczości, dla których skala falki  $a = 2^j$  odpowiada rozdzielczości  $2^{-j}$  i jest określone jako:

$$DWT_s(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(n) \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi\left(\frac{n - b}{2^j}\right) dn \quad (2)$$

Przyrównując rodzinę funkcji analizującej dla przypadku ciągłego i diadycznego otrzymujemy:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t - b}{a}\right) \equiv \Psi_{j,k}(n) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j} n - k) \quad (3)$$

Zależność  $\Psi_{j,k}(n) = 2^{-j/2}\Psi(2^{-j}n-k)$  definiuje rodzinę funkcji analizujących dla przypadku diadycznego. Dla ustalonego  $j$  mamy stałą skalę  $2^j$ . Zmiana  $j$  o 1 oznacza dwukrotną zmianę skali. Zmieniając postać równania (3) na równoważne:

$$\Psi_{j,k}(n) = 2^{-j/2}\Psi(2^{-j}(n-2^j k)) \quad (4)$$

oraz wyróżniając  $\Psi_{j0}(n) = 2^{-j/2}\Psi(2^{-j}n)$  jako falkę podstawową dla ustalonego poziomu skali  $j$  otrzymujemy:  $\Psi_{j,k} = \Psi_{j0}(n-2^j k)$ , co oznacza, że  $2^j$  jest krokiem, z jakim jest przesuwana w czasie falka podstawowa  $\Psi_{j0}(n)$  na poziomie ustalonej skali  $j$ . Kolejne potęgi dwójki wyznaczają próbkowanie na osi skali. Dyskretna analiza falkowa sygnału  $s(n) \in L_2$  sprowadza się do wyznaczania jego dyskretnych transformatafalkowych, które są iloczynami skalarnymi sygnału  $s$  i ciągu funkcji  $\Psi_{j,k}$ . Iloczyny te nazywamy współczynnikami falkowymi.

Dwa parametry  $j$  i  $k$  zapewniają dostęp do określonych cech sygnału. Parametr  $k$  umożliwia zlokalizowanie chwili, w której chcemy dokonać analizy sygnału, a parametr  $j$  umożliwia wybranie poziomu skali czy też zakresu częstotliwości, w którym chcemy zbadać widmo częstotliwościowe sygnału. Argument  $k$  oznacza chwilę  $2^j k$ , to znaczy krok kwantyzacji w czasie  $2^j$  zmienia się wraz z poziomem skali  $j$  (Misiti M. i inni, 1997). Nieodpowiedni wybór falki może spowodować nieliniowe zniekształcenia tego widma.

Detal  $D_j$  zdefiniowany jest jako (Białasiewicz J., 2000, Misiti M. i inni, 1997):

$$D_j(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} DWTs(j,k) \Psi_{j,k}(n) \quad (5)$$

Zakładając, że współczynnik skali  $a=2^j \leq 2J$ , można zdefiniować aproksymację jako:

$$A_J = \sum_{j > J} D_j \quad (6)$$

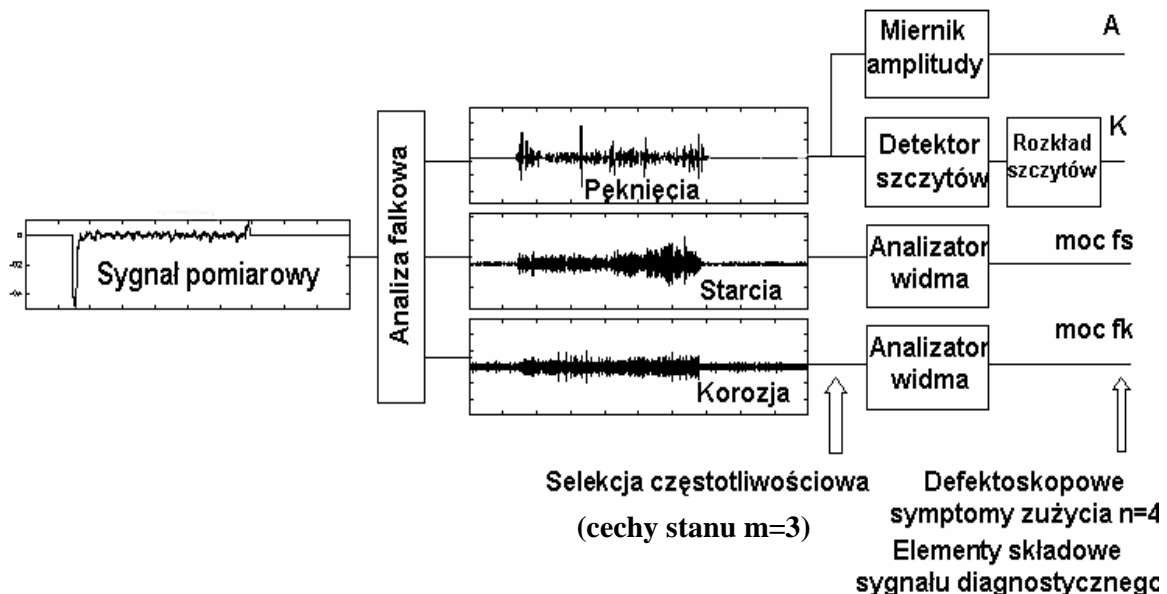
Analizowany sygnał jest superpozycją (sumą) ostatniej aproksymacji i wszystkich detali:

$$s(n) = A_J + \sum_{j \leq J} D_j \quad (7)$$

gdzie:  $A_J$  – aproksymacja poziomu  $J$  dekompozycji,  
 $D_j$  – detale  $j$ -tego poziomu dekompozycji (rozdzielczości).

#### Wybór pasma częstotliwości detalu dla wybranej cechy stanu liny

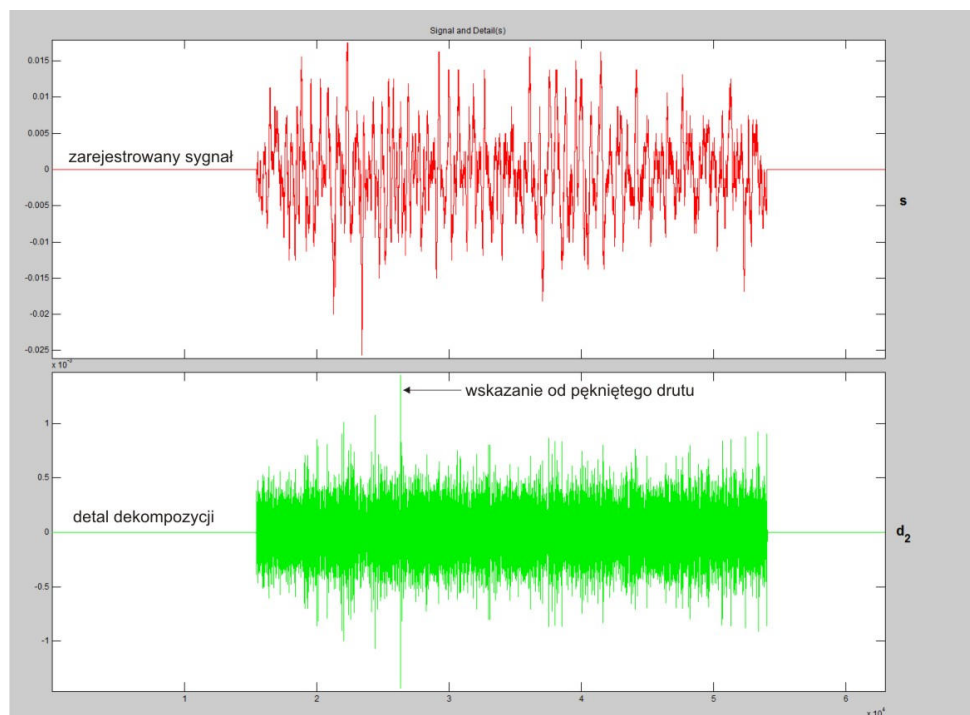
Sygnał pomiarowy (wektor jednowymiarowy) poddany np. analizie falkowej, czyli pośrednio selekcji widmowej, rozkładany jest na poszczególne poziomy rozdzielczości. W efekcie tego uzyskujemy wektor wielowymiarowy z wyodrębnionymi parametrami (cechami) stanu (rys.17).





**Rys.17.** Selekcja częstotliwościowa sygnału pomiarowego.

Na rysunku 18 przedstawiono zarejestrowany sygnał z badania liny kompaktowanej oraz wybrany detal dekompozycji z widoczną zmianą spowodowaną pęknięciem drutu liny.



**Rys.18.** Sygnał i detal dekompozycji z badania liny kompaktowanej.

## 6 PODSUMOWANIE

Analiza falkowa sygnału niestacjonarnego jest znakomitym narzędziem ułatwiającym określenie symptomów zużycia lin kompaktowanych, jednak wymagana jest przy tym zmiana (w stosunku do obecnie stosowanej aparatury): parametrów metrologicznych zastosowanej aparatury uwzględniających poziom namagnesowania liny, parametrów technicznych zastosowanych czujników, parametrów rejestracji oraz wiedza o procesie pozyskiwania i akwizycji danych pomiarowych. Pewnym ułatwieniem w ocenie stanu technicznego lin kompaktowanych może być preparatyka (zastosowanie replik) pozwalająca na obserwację stanu powierzchni badanych lin.

Należy kontynuować prace nad poszukiwaniem korelacji między obrazem repliki z badanej powierzchni liny, a symptomami określonymi w detalu dekompozycji w połączeniu z czasem eksploatacji lin kompaktowanych.

Koniecznym staje się prowadzenie dalszych szczegółowych badań nad rozwojem metodyki badań lin kompaktowanych.

## LITERATURA

- [1] Białasiewicz J. 2000, T.: Falki i aproksymacje. WNT, Warszawa.
- [2] Kwaśniewski J. 2000: Applications of wavelet analysis to detecting wire rope cracks and abrasion. Archives of Mining Sciences Vol.45, Issue1 Warszawa - Kraków.
- [3] Kwaśniewski J. 2011: The use of monitoring to improve the reliability and endurance of continuous coal handling systems. Monitoring elementem zwiększenia trwałości i niezawodności ciągłych systemów transportu węgla Archives of Mining Science Vol.56, No 4, p.651-664

- [4] Kwaśniewski J., Lankosz L., Zawada K.1999: Zastosowanie nowoczesnych metod analizy sygnałów do identyfikacji i obliczeń różnych rodzajów zużycia lin w aspekcie poprawy bezpieczeństwa ich pracy. Zeszyty Naukowo-Techniczne nr 13, Wydawnictwo KTL s. 87–94, Kraków.
- [5] Kwaśniewski J., Magalas L.2000: *Selected Applications of the Wavelet Transform*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup>
- [6] International School on Mechanical Spectroscopy MS-2 held at Kraków-Krynica, Copyright © 2003
- [7] Scitec Publications Ltd, Switzerland ISBN 978-3-908450-74-0 Volumes 89-90 of Solid State Phenomena
- [8] ISSN 1012-0394
- [9] Misiti M. i inni 1997: *Wavelet Toolbox For Use with Matlab*, The MathWorks Inc.
- [10] Mrozek B., Mrozek Z.1995: *Matlab uniwersalne środowisko do obliczeń naukowo-technicznych*. CCATIE, Kraków.
- [11] Materiały promocyjne firmy Struers <http://www.struers.com>