

AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE



WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
I ROBOTYKI
KATEDRA TRANSPORTU LINOWEGO

PRACA DOKTORSKA

Imię i nazwisko: **Tomasz Machula**

Kierunek studiów: **Mechanika i Budowa Maszyn**

Temat:

**Opracowanie metody ciągłej analizy
stanu technicznego taśm
przenośnikowych z linkami stalowymi**

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Kwaśniewski - profesor AGH

KRAKÓW 2011

Składam serdeczne podziękowania
Panu dr. hab. inż. Jerzemu Kwaśniewskiemu – Profesorowi AGH
za pomoc i opiekę naukową.

Spis treści

Spis treści	1
1. Wstęp	2
2. Cel, tezy i zakres pracy	3
3. Analiza stanu wiedzy dotyczącej taśm z linkami stalowymi	4
4. Przegląd metod badania taśm z linkami stalowymi.....	10
5. Opis standardowej metody oceny stanu technicznego taśm z linkami stalowymi	33
6. Opracowanie założeń systemu diagnostycznego CRU.....	40
7. Budowa analizatora stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi	53
7.1. Opis części mechanicznej (głowica segmentowa)	54
7.2. Opis części elektronicznej (analizator uszkodzeń)	68
8. Weryfikacja parametrów diagnostycznych systemu pomiarowego.....	75
8.1. Badania laboratoryjne	75
8.2. Badania przemysłowe głowicy segmentowej	93
9. Określenie niepewności pomiarowej analizatora.....	97
10. Implementacja logiki rozmytej w diagnostyce taśm z linkami stalowymi	100
11. Wnioski i podsumowanie	108
Bibliografia	110

1. Wstęp

Przenośniki taśmowe zaliczane są do ciągnowych urządzeń transportowych pracujących w sposób ciągły. Ich zadaniem jest transport materiałów drobnych oraz sypkich. Urządzenia te wykorzystywane są głównie w kopalniach podziemnych, odkrywkowych, jak również w budownictwie, czy wreszcie w magazynach oraz liniach produkcyjnych. Materiały sypkie, przemieszczane niekiedy na wielokilometrowe odległości przez te urządzenia, które są połączone szeregowo. Przenośniki taśmowe stosowane są wszędzie tam, gdzie zastosowanie innych rodzajów transportu, w tym transportu samochodowego czy kolejowego, jest utrudnione lub też nieekonomiczne.

Przenośniki ze względu na rodzaj zastosowanej taśmy możemy podzielić na te z taśmą stalowo-gumową oraz takie, gdzie rdzeń stanowi tkanina. Jednak w tej pracy szczególną uwagę skoncentrowano na taśmach z zawulkanizowanymi linkami stalowymi, które odgrywają kluczową rolę w przemyśle wydobywczym [1, 16, 19].

Taśmy gumowe z linkami stalowymi przeznaczone są do transportu różnorodnych materiałów i stosowane są przeważnie na długich (powyżej 500 m) i nachylonych pod dużym kątem magistralach transportowych. Charakteryzują się wysoką wytrzymałością, małą wydłużalnością oraz niską awaryjnością w porównaniu z taśmami z rdzeniem tkaninowym [13, 21]. Do wad taśm z linkami stalowymi można zaliczyć przede wszystkim konieczność stosowania skomplikowanej, pracochłonnej i kosztownej technologii łączenia, a także wysoki koszt samej taśmy, który niejednokrotnie przekracza połowę kosztów całego urządzenia. Dlatego też taśmy muszą spełniać określone wymagania, do których zalicza się m.in. wysoką wytrzymałość na zerwanie, małe wydłużenie wywołane obciążeniem, małą masę własną, odporność na ścieranie, uderzenie i przebicie, a także wysoką odporność na działanie czynników atmosferycznych, niepalność i antystatyczność. Ze względu na wysokie koszty zakupu nowej taśmy istotną sprawą jest odpowiednio wczesne wykrycie uszkodzeń i ich naprawa [21]. Jest to możliwe do zrealizowania jedynie przez zastosowanie systemów diagnostycznych pozwalających na ocenę stanu technicznego taśmy przenośnikowej w czasie rzeczywistym.

2. Cel, tezy i zakres pracy

Cel pracy

Obecnie w polskim górnictwie eksploatowanych jest ponad 2000 km tras przenośnikowych. Diagnostyka techniczna przenośnikowych systemów transporterowych jest coraz częściej podstawą do podejmowania decyzji eksploatacyjnych. W zakresie przenośników taśmowych główny nacisk położony jest na diagnostykę taśm i ich połączeń [6]. Proces monitorowania taśm, podczas którego w czasie rzeczywistym obserwowane są symptomy zużycia, pozwala na postawienie diagnozy jej stanu technicznego, a co za tym idzie na prognozowanie czasu bezpiecznej pracy i poprawę niezawodności urządzenia transportowego w trakcie jego eksploatacji.

Obserwacja parametrów zużycia taśmy, jej cech stanu i symptomów zużycia w trakcie normalnej pracy urządzenia realizowane jest za pomocą systemu ciągłej rejestracji uszkodzeń.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie założeń niezbędnych do budowy systemu diagnostycznego oraz opracowanie metody ciągłej analizy stanu technicznego przenośników taśmowych z linkami stalowymi. W ramach pracy wykonane zostanie urządzenie składające się z głowicy segmentowej i analizatora uszkodzeń ze specjalistycznym oprogramowaniem.

Tezy pracy

1. Opracowany system diagnostyczny taśm z linkami stalowymi pozwoli na obserwację symptomów uszkodzeń i ocenę cech stanu taśmy w czasie rzeczywistym.
2. Wykorzystanie informacji diagnostycznych zawartych w macierzy obserwacji znacząco wpłynie na poprawę bezpieczeństwa pracy przenośników taśmowych.
3. Zastosowanie logiki rozmytej do analizy macierzy obserwacji pozwoli na określenie miejscowego wskaźnika zużycia taśmy.

Zakres pracy

W ramach niniejszej pracy opracowałem metodę ciągłej analizy stanu technicznego taśm z linkami stalowymi. W rozdziale trzecim przedstawiłem analizę stanu wiedzy, dotyczącej zagadnień związanych z połączeniami taśmy z linkami stalowymi. Sposób wykonania połączenia ma istotny wpływ na kształt rejestrowanego sygnału.

Rozdział czwarty zawiera opis metod badań taśm z zawulkanizowanymi linkami stalowymi, które są obecnie najczęściej wykorzystywane na świecie do badania ich stanu technicznego.

W kolejnym rozdziale pracy przedstawiono opis polskiej metody badania stanu technicznego taśm opracowanej w Katedrze Transportu Linowego Akademii Górniczo-Hutniczej i od lat wykorzystywanej do diagnostyki cięgien stalowo-gumowych i taśm przenośnikowych.

W rozdziale szóstym przedstawiono założenia niezbędne do budowy nowego innowacyjnego systemu pomiarowego służącego do oceny stanu technicznego taśm z linkami stalowymi.

W rozdziale siódmym opisano system diagnostyczny, ze szczególnym uwzględnieniem części mechanicznej i elektronicznej wchodzącej w jego skład.

W rozdziale ósmym zostały przedstawione badania weryfikacyjne opracowanej metody ciągłej analizy stanu technicznego taśm z linkami stalowymi w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach przemysłowych na rzeczywistym obiekcie.

W rozdziale dziewiątym niniejszej pracy, na podstawie badań laboratoryjnych, oszacowano wartość niepewności pomiarowej analizatora.

Rozdział dziesiąty niniejszej pracy zawiera podstawy logiki rozmytej i przedstawia możliwości jej implementacji przy tworzeniu funkcji przynależności wykorzystywanych w diagnostyce taśm z linkami stalowymi w tak zwanych systemach ekspertowych.

Wnioski i podsumowanie kończą niniejszą pracę.

3. Analiza stanu wiedzy dotyczącej taśm z linkami stalowymi [6,13, 23]

Taśma przenośnikowa musi mieć szereg właściwości takich jak dostateczna wytrzymałość wzdłużna i poprzeczna, aby mogła przenieść obciążenia powstające podczas spadku urobku na jej powierzchnię, transportu nadawy po zestawie krążników, jak również siły wzdłużne pochodzące od bębnow napędowych i napinających.

Ponadto taśma przenośnikowa powinna charakteryzować się odpowiednią trwałością, elastycznością, odpornością na przebicia czy inne uszkodzenia mechaniczne oraz odpowiednią ścieralnością.

Odcinki taśmy są ze sobą łączone, aby można było transportować nadawę na znaczne odległości. Realizowane jest ono jako połączenie dwóch odpowiednio przygotowanych końców taśmy przenośnikowej przy użyciu metody chemicznej lub mechanicznej.

Łączenie taśm przenośnikowych jest czynnością wykonywaną w trzech przypadkach:

- montażu nowych taśm na przenośniku,
- podczas planowych działań eksploatacyjnych (skręcanie, wydłużanie przenośnika),
- w przypadku awarii.

Istnieją trzy podstawowe typy połączeń taśm przenośnikowych:

- połączenie wulkanizowane,
- połączenie mechaniczne (tylko dla taśm tkaninowych),
- połączenia klejone (tylko dla taśm tkaninowych).

Połączenia mechaniczne są możliwe dzięki zastosowaniu specjalnych elementów złącznych. Możemy podzielić je na rozłączne i nierozłączne (rys. 3.1, 3.2). Połączenia rozłączne (zawiasowe) charakteryzują się możliwością rozłączenia dwu końcówek taśmy przez wyciągnięcie łączącej je linki. W połączeniach nierozłącznych oba końce łączonej taśmy są sztywno ze sobą zespolone.



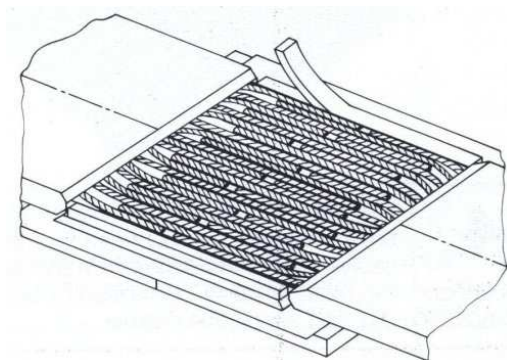
Rys. 3.1. Połączenie rozłączne [37]



Rys. 3.2. Połączenie nierozłączne [37]

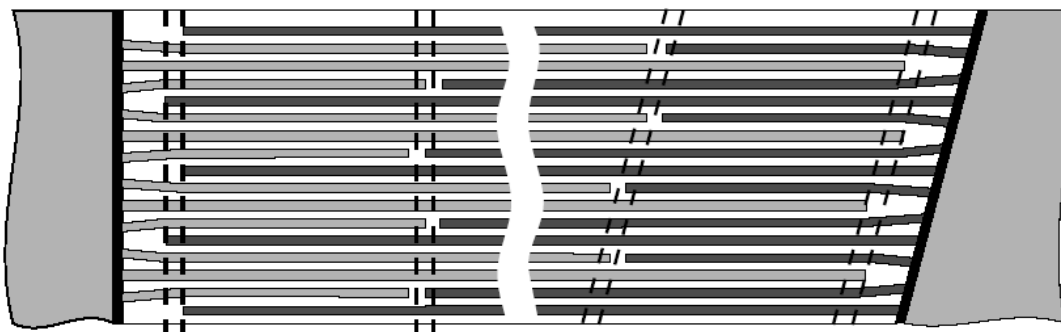
Innym ze sposobów połączenia ze sobą dwóch końców taśmy jest wulkanizacja. Jest to proces technologiczny polegający na sieciowaniu kauczuku w celu przekształcenia go w gumę. Wulkanizację kauczuku prowadzi się w temp. 140-180°C, stosując odpowiednie środki wulkanizacyjne (najczęściej siarkę) w obecności przyspieszaczy wulkanizacji, pod zwiększonym ciśnieniem. W wyniku wulkanizacji kauczuk staje się elastyczny w szerokim zakresie temperatury, ma większą wytrzymałość na rozciąganie, lepszą odporność na działanie rozpuszczalników itp. [1, 6, 23].

W przypadku taśm z linkami stalowymi nie łączy się bezpośrednio linek ze sobą. Połączenie wykonuje się przez zawulkanizowanie nowego odcinka taśmy o długości połączenia, wewnątrz którego linki wychodzące z obydwu końców zachodzą między siebie (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Sposób połączenia ze sobą końców taśmy [34]

Taśmy z linkami stalowymi można łączyć jedynie metodą wulkanizacji na gorąco. Linki stalowe połączonych ze sobą końców taśm nie stykają się. Siły wzdłużne w połączeniu przenoszone są przez gumę rdzeniową (pracującą na ścinanie) znajdującą się pomiędzy zachodzącymi między siebie linkami. Sposób ułożenia linek w połączeniu nazywamy schematem ułożenia linek. Zależy on od podziałki linek w taśmie oraz od ich średnicy. Wymiary połączenia zależne są od typu i szerokości taśmy. Kształt połączenia może być prostokątny lub romboidalny w zależności od kształtu płyt grzejnych stosowanych pras wulkanizacyjnych (rys. 3.4).

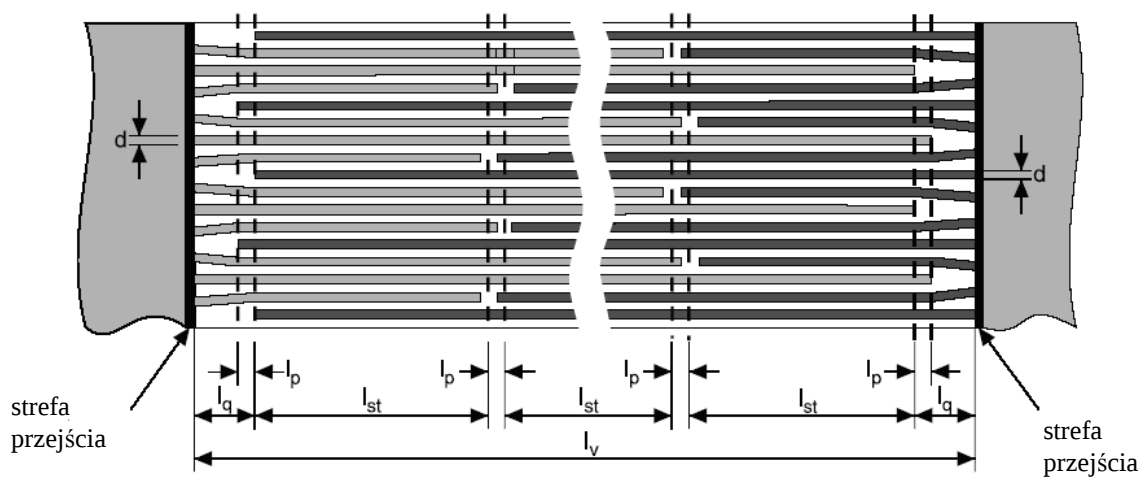


Rys. 3.4. Kształt połączenia końców taśmy [35]

Wytrzymałość obydwu kształtów połączeń jest porównywalna. Popularniejsze jednak są połączenia prostokątne ze względu na łatwiejsze ich wykonanie.

Konstrukcja geometryczna połączeń końców taśmy (rys. 3.5) zależy od:

- liczby stopni,
- długości stopni,
- długości przejść,
- podziałki linek w miejscu połączenia.

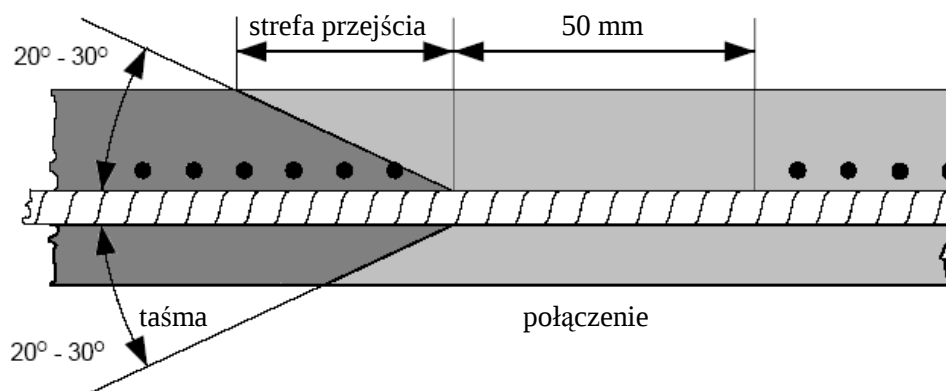


Rys. 3.5. Schemat ułożenia linek przed wulkanizacją [35]

gdzie:

- l_v – długość połączenia,
- l_q – długość strefy odgięcia linek,
- l_{st} – minimalna długość stopnia,
- l_s – odległość pomiędzy uciętymi końcami linek (rys 3.8),
- d – średnica linek,
- l_p – odległość montażowa.

W przypadku taśm z zawulkanizowanymi poprzecznymi wzmocnieniami, zwanymi breakerami, odległość pomiędzy nimi a fazowaną strefą przejścia powinna wynosić ok. 50 mm (rys. 3.6).

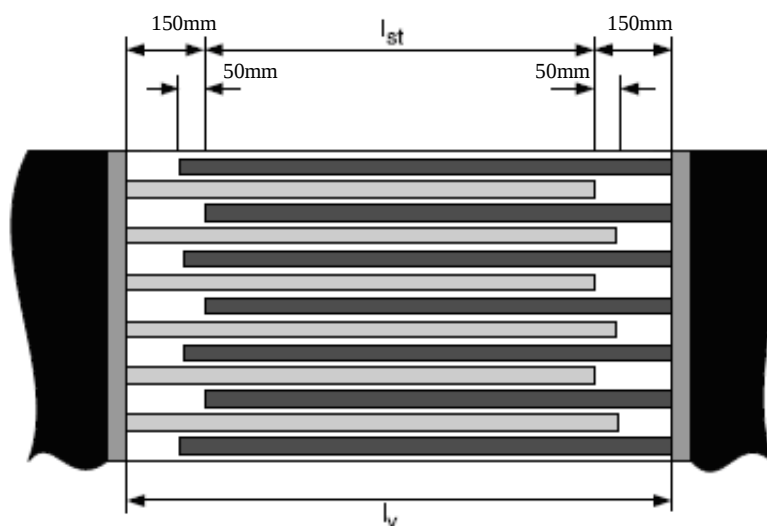


Rys. 3.6. Schemat wulkanizacji dwóch końców taśm z breakerami [35]

Rozróżnia się cztery podstawowe schematy połączenia linek:

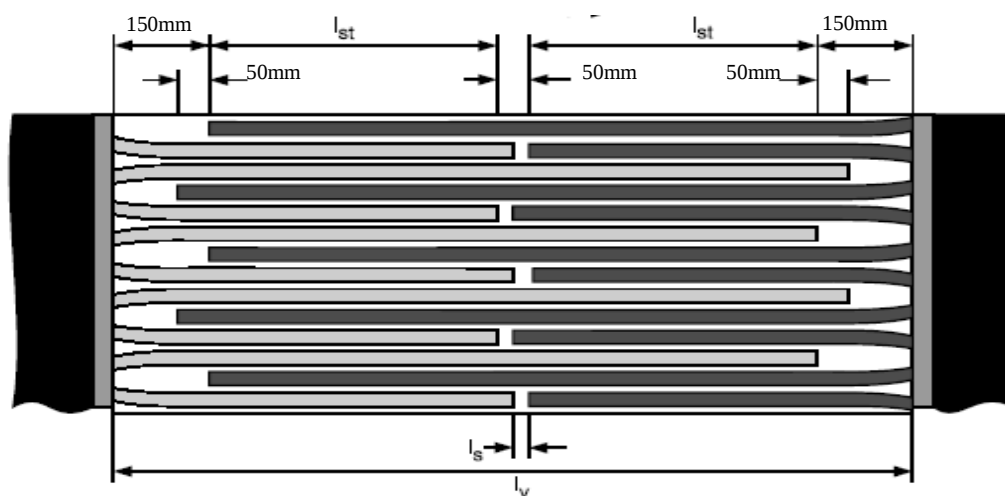
- jednostopniowy,
- dwustopniowy,
- trzystopniowy,
- czterostopniowy.

Połączenie jednostopniowe (rys. 3.7).



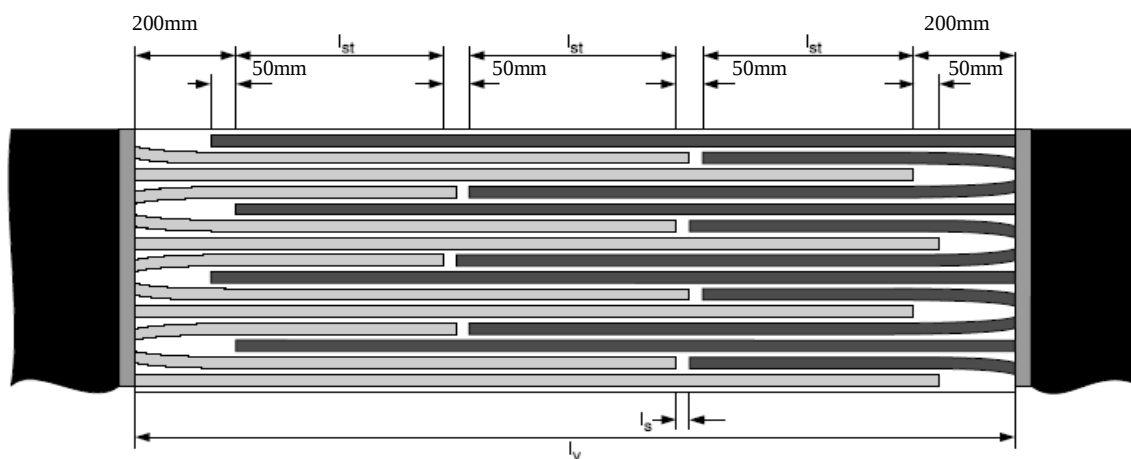
Rys. 3.7. Schemat połączenia jednostopniowego [35]

Połączenie dwustopniowe (rys. 3.8).



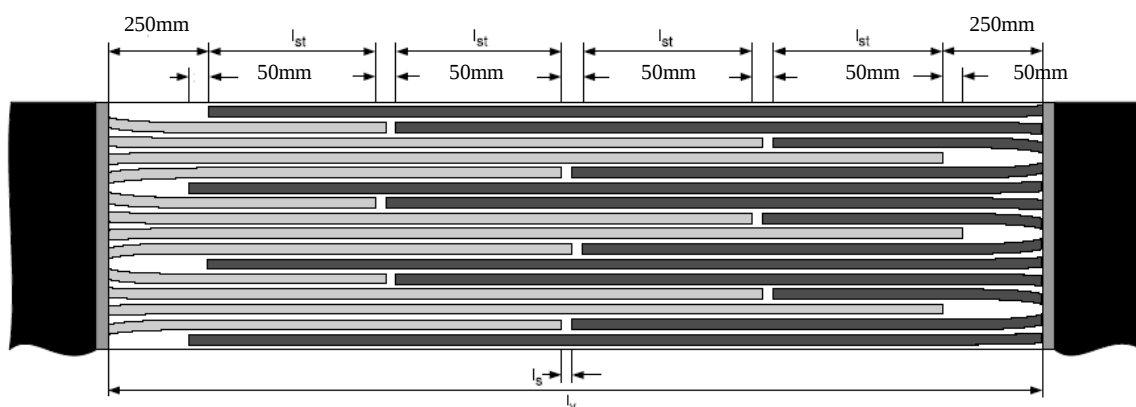
Rys. 3.8. Schemat połączenia dwustopniowego [35]

Połączenie trzystopniowe (rys.3.9).



Rys. 3.9. Schemat połączenia trzystopniowego [35]

Połączenie czterostopniowe (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Schemat połączenia czterostopniowego [35]

Schemat ułożenia linek oraz długości stopni i połączenia mogą być oczywiście modyfikowane, jeśli zajdzie taka potrzeba. Mówimy wówczas, że mamy do czynienia z tak zwanymi połączeniami kombinowanymi.

Przyjęcie sposobu ułożenia linek stalowych w połączeniu jest niezmiernie istotna przy badaniu taśmy z zastosowaniem metody magnetycznej. Kształty generowanych sygnałów otrzymywanych podczas stosowania metody magnetycznej pozwalają na prawidłowy wybór metody analizy przy ocenie stanu połączenia. Dlatego też bardzo ważne jest zachowanie podczas łączenia odcinków taśmy wszystkich wymiarów przedstawionych na schematach połączeń zgodnie z założoną przez producenta tolerancją.

4. Przegląd metod badania taśm z linkami stalowymi

Awaryjne przestoje przekaźników taśmowych mogą prowadzić do wielogodzinnych przestojów, a co za tym idzie ogromnych strat finansowych. Aby tego uniknąć, przedsiębiorcy na świecie wykorzystują szereg systemów diagnostycznych, sprawdzających stan taśm przekaźnikowych. Do tej pory testowano główne elementy tj.: silniki elektryczne, reduktory, koła pasowe i zębate, wały, łożyska sprzęgła, czyli elementy współpracujące ze sobą w łańcuchu kinematycznym.

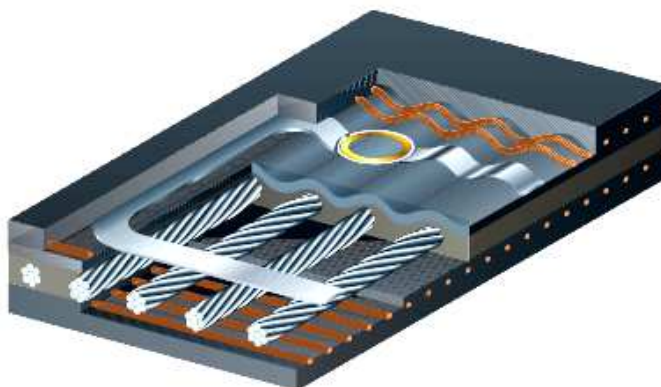
Do oceny stanu technicznego taśmy można by zastosować badania wizualne, lecz są one niepraktyczne, gdyż wiele rodzajów uszkodzeń nie można wykryć tą metodą. Przykładem mogą być tutaj wewnętrzne uszkodzenia linek stalowych, stanowiących rdzeń taśmy i zarazem przenoszących największe naprężenia. Dodatkowe czynniki wpływające na powstawanie wad eksploatacyjnych to zużycie korozyjne i zmęczeniowe, a także wszelkiego rodzaju deformacje w układzie drutów, spletek. Ważne jest także określenie stanu połączeń występujących w taśmie przekaźnikowej. Procesy zużywania linek stalowych wiążą się przede wszystkim z takimi czynnikami jak postępujący ubytek przekroju nośnego spowodowany korozją, jak również złomami zmęczeniowymi drutów. Procesy te w znacznej mierze zależą od stanu linek przed zawulkanizowaniem, rozrzutu własności sprężystych poszczególnych linek oraz jakości połączenia linek z gumą taśmy. Proces wulkanizacji uniemożliwia ocenę stanu technicznego metodami wizualnymi, dlatego też ogromną rolę odgrywają tutaj badania nieniszczące.

Sytuacja ta skłoniła instytucje zajmujące się eksploatacją przekaźników do opracowania różnych metod diagnostycznych, które zostały przedstawione i porównane

w niniejszej pracy. Niestety twórcy metod nie ujawniają szczegółów swoich systemów pomiarowych. W niniejszej pracy przedstawiono jedynie osiem systemów diagnostycznych, dla których producenci udostępnili wybrane parametry metrologiczne.

4.1. System ContiTronic

ContiTronic (rys. 4.1) jest systemem monitorowania taśm transporterowych identyfikującym uszkodzenia poprzez wykorzystanie fal radiowych. Został on opracowany przez firmę ContiTech, a dokładnie przez jej oddział Conveyor Belt Group. System ten wykorzystuje obwody scalone zawulkanizowane w taśmie przenośnika, które są zdolne magazynować, nadawać i odbierać wszystkie istotne dane o typie taśmy przenośnika, konstrukcji i zastosowaniu. W taśmie zostaje wtopiona specjalna metalowa pętla, która po podłączeniu do układu scalonego tworzy system wczesnego ostrzegania i zabezpiecza taśmę przed podłużnym rozcięciem. System potrafi dokładnie zlokalizować miejsce uszkodzenia na taśmie oraz zatrzymać ją w celu naprawienia uszkodzenia [29, 31].



Rys. 4.1. Taśma przenośnikowa z zawulkanizowanym transponderem [31]

Sam transponder (rys. 4.2) składa się z anteny, która normalnie jest mniejsza od anteny czytnika oraz obwodu scalonego, pełniącego rolę pamięci i sterownika. Zawulkanizowane w przenośniku taśmowym transpondery pozwalają na:

- identyfikację taśmy przenośnika przez gromadzenie, a następnie wysyłanie wszystkich istotnych danych o typie taśmy, konstrukcji i jej zastosowaniu;
- monitorowanie stanu technicznego taśmy z podaniem informacji o jej podłużnych rozcięciach;
- kontrolę taśmy albo jej sekcji poprzez układ analizujący.



Rys. 4.2. Widok transpondera [29]

Transpondery mogą być używane do wszystkich rodzajów taśm transporterowych i praktycznie we wszystkich gałęziach przemysłu. Transponder jest zawsze aktywowany do transferu danych po jego wejściu w pole magnetyczne odbiornika składającego się z głowicy czytającej. W ten sposób układ ten może transmitować (wysyłać i odbierać) dane. Wszystkie dane są analizowane w głównym komputerze.



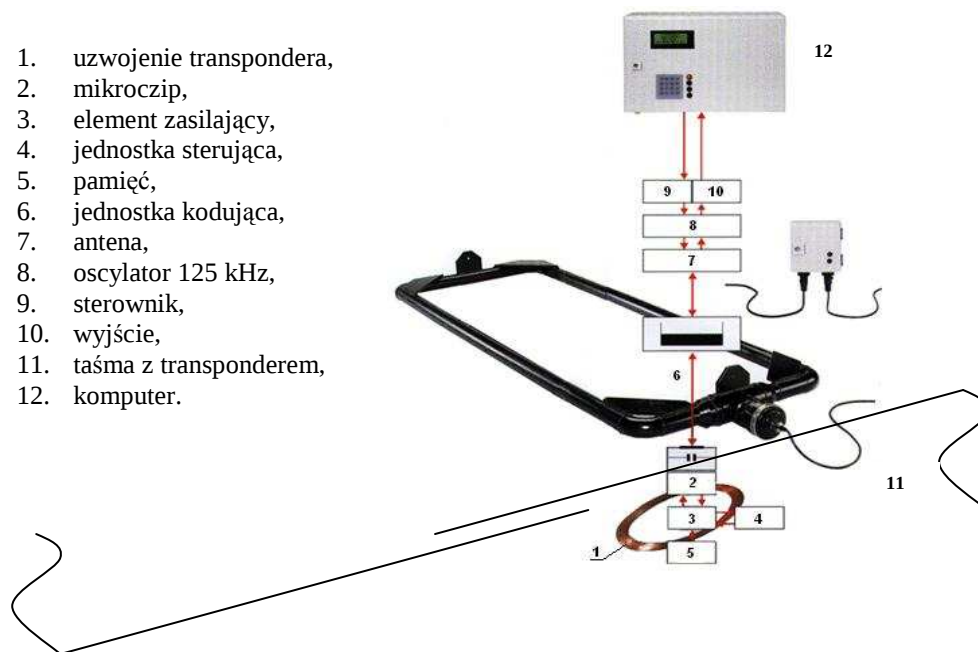
Rys. 4.3. System ContiTronic [31]

Jednym ze sposobów przeciwdziałania zerwaniu taśmy jest zainstalowanie w niej specjalnych czujników sygnalizujących uszkodzenie lub zużycie taśmy, opartych na działaniu transponderów – urządzeń elektronicznych stosowanych – w systemach tak zwanego radaru

czynnego. Transponder odbiera sygnały radiowe z jednego układu (nadawczego), gromadzi je, przetwarza i wzmacnia oraz przekazuje do innego układu odbiorczego. Transpondery zaimplantowane w taśmie (wytrzymują temperatury wulkanizacji do 160° i ciśnienie do 4 MPa), pozwalają na ocenę zużycia ściernego taśmy, identyfikację połączeń, wykrycie uszkodzenia lub rozcięcia taśmy (rys. 4.3).

Rys. 4.4. Schemat budowy systemu ContiTronic. [29]

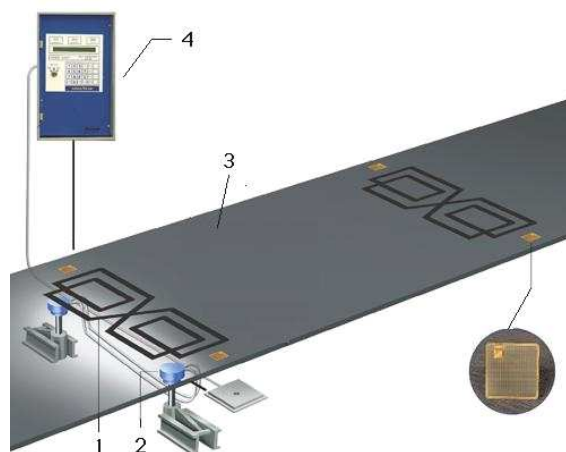
1. uzwojenie transpondera,
2. mikrochip,
3. element zasilający,
4. jednostka sterująca,
5. pamięć,
6. jednostka kodująca,
7. antena,
8. oscylator 125 kHz,
9. sterownik,
10. wyjście,
11. taśma z transponderem,
12. komputer.



Elementami składowymi systemu ContiTronic (rys. 4.4) są: taśma 11 z zaimplantowanymi transponderami, układ nadawczo-odbiorczy (stały lub przenośny) z anteną pracującą na częstotliwości 125 kHz oraz układ sterujący 9 z komputerem 12 zbierającym dane, wyposażonym w odpowiednie oprogramowanie.

4.2 System Sensor Guard

Innym, od wielu lat stosowanym systemem kontroli stanu taśmy, jest system Sensor Guard firmy Goodyear [27].



Rys. 4.5. System Sensor Guard firmy Goodyear [27];

1 – czujnik, 2 – głowica, 3 – taśma przenośnikowa, 4 – jednostka sterująca

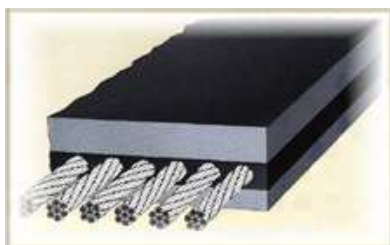
System ten służy do monitorowania taśmy z uwagi na wzdłużne przecięcia. Sygnalizuje ruchy poprzeczne oraz nadmierny poślizg taśmy. System (rys. 4.5) składa się z czujnika 1 w postaci pętli przewodów zawulkanizowanych w taśmie 3, z detektora elektromagnetycznego w postaci głowic 2, z których jedna służy jako wejście i druga jako wyjście, połączonych przewodem z jednostką sterującą 4. Jednostka sterująca interpretuje sygnały detektora, wyświetla sygnały prawidłowego lub nieprawidłowego działania układu. Czujniki są zawulkanizowane w taśmie przenośnikowej co 30 m. Czujniki i głowice są sprzęgnięte polem elektromagnetycznym. Jeżeli wystąpi brak sygnału z przeciętej pętli przewodów czujnika, to jednostka sterująca wyłącza przenośnik i wyświetla alarm. Detektory elektromagnetyczne instaluje się w tych miejscach, w których istnieje największe prawdopodobieństwo uszkodzenia taśmy, jej zejścia na boki lub poślizgu. Czujnik w postaci pętli przewodów jest wbudowany w okładkę bieżną taśmy.

Dane zebrane z czujników są następnie wykorzystywane w systemie informatycznym, poprawiającym zarządzanie eksploatacją transportu taśmowego. Komputerowa baza danych, sprzęgnięta z odpowiednim oprogramowaniem, ułatwia następnie podejmowanie decyzji w zakresie analizy i predykcji trwałości i niezawodności przenośników taśmowych, w zakresie poprawy systemu obsługi zapobiegawczej wraz z koordynacją zaopatrzenia kopalni w niezbędne części zamienne i materiały. Przyczynia się także do szybkiego zapobiegania lub usuwania awarii poprzez sprawną lokalizację obiektu oraz miejsca wystąpienia uszkodzenia.

Opracowanie takich systemów kontrolnych procesów transportu ciągłego staje się dla kopalń pilną koniecznością. Wykorzystywanie bowiem uproszczonych, ręcznie opracowywanych raportów jest nieefektywne i przynosi kopalniom straty ekonomiczne wynikające ze zmniejszonej dyspozycyjności systemu odstawy przenośnikowej, złego wykorzystania „dniówek” przeznaczonych na konserwację urządzeń, tworzenia nadmiernych zapasów części zamiennych lub ich braku, z wydłużonego czasu usuwania uszkodzeń lub awarii i wreszcie wynikające z konkretnych nieprzewidzianych postojów odstawy przenośnikowej.

4.3. System Belt C.A.TTM [8, 9, 10, 11, 32, 34]

Taśma z linkami stalowymi składa się z trzech podstawowych części: rdzenia, okładki górnej oraz dolnej. Rdzeń służy do przenoszenia naprężeń, a okładka górna i dolna do podtrzymywania produktu. Rdzeń taśmy składa się ze stalowych linek ułożonych jedna obok drugiej zatopionych w gumie (rys. 4.6). Taśma przenośnika składa się z odcinków, które na drodze wulkanizacji są ze sobą połączone (rys. 4.7). Najdłuższe taśmy składają się nawet z 50 odcinków.



Rys. 4.6. Przekrój taśmy ze stalowymi linkami [34]

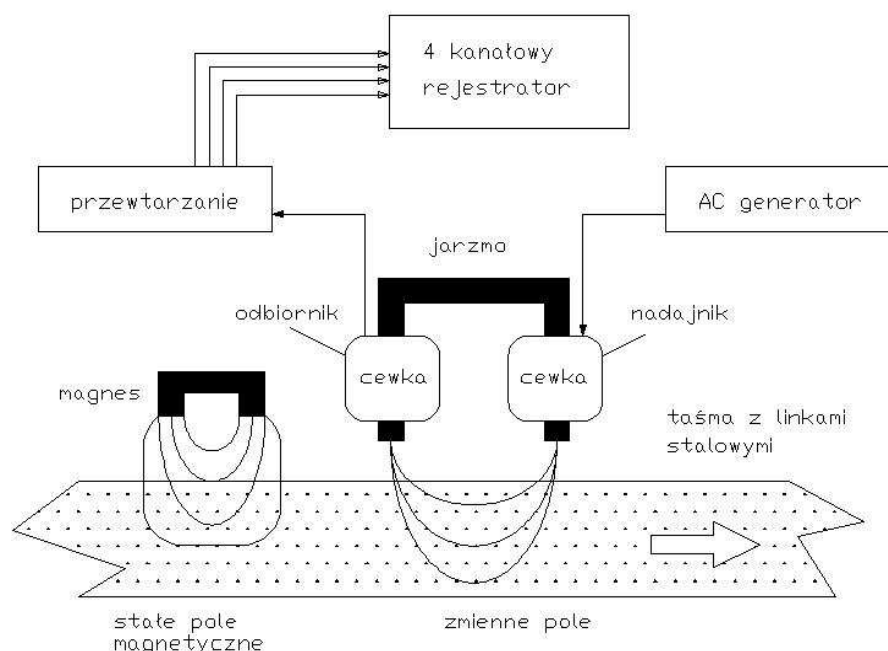


Rys. 4.7. Schemat dwustopniowego połączenia taśm [34]

Stalowe linki wraz z otaczającą je warstwą gumy przenoszą 100% naprężeń. Dlatego bardzo ważnym staje się zbadanie stanu technicznego samych linek oraz ich połączeń. Opisywanym systemem można wykrywać zewnętrzną i wewnętrzną korozję

linek, pęknięcia pojedynczych drutów, pęknięcia całych linek czy też sprawdzić stan połączenia.

W chwili obecnej w urządzeniach pomiarowych stosuje się metody wykorzystujące prądy wirowe, sprzężenie indukcyjne, częstotliwości radioelektryczne obwodu drgań, strumień rozproszony. Podstawą tych metod są magnetyczne techniki badania lin zapoczątkowane na przełomie XIX i XX wieku. Pod koniec lat 70. grupa naukowców z CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*) w Australii przeprowadziła badania przenośników taśmowych z zastosowaniem niektórych wyżej wymienionych metod. Zaowocowało to rozwojem systemu NTD, który stał się znany jako „CBM” (*Conveyor Belt Monitoring*) [8, 9, 10, 11]. System ten został wprowadzony na rynek i jest powszechnie stosowany. Schemat jednej z wersji CBM pokazany jest na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. System CBM [34]

System ten ma kilka ograniczeń takich jak:

- wrażliwość na zmiany szczeliny powietrznej między linkami stalowymi a powierzchnią cewki, co wymaga zapewnienie stabilności taśmy (wyeliminowanie drgań poprzecznych);
- pomiar jest mało dokładny, przez co niewielkie uszkodzenia mogą nie zostać zarejestrowane;
- słaba zdolność rozróżniania położenia wady wzdłuż szerokości taśmy;

- sygnał uzyskany z cewki odbiorczej jest wykreślany w formie diagramu bez możliwości lokalizacji uszkodzenia wzdłuż długości taśmy;
- wrażliwość na początkowy stan namagnesowania linek stalowych.

System „CBM” NDT, pomimo wyżej wymienionych wad, był narzędziem używanym do diagnostyki taśm przenośnikowych przez prawie dwie dekady.

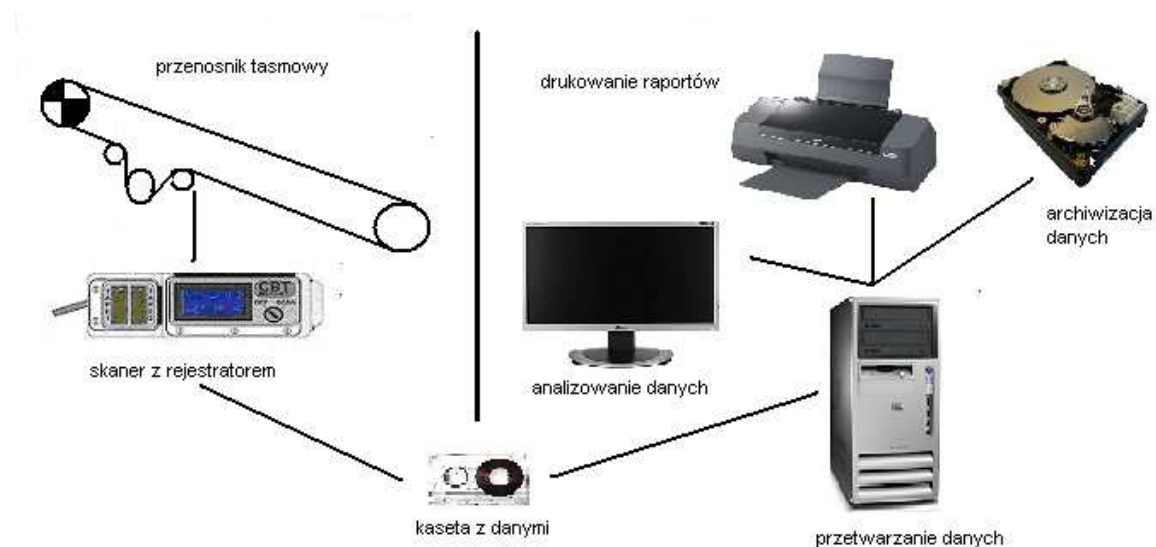
Badanie taśmy przenośnika taśmowego tym systemem nie było łatwym zadaniem. W praktyce należy badać taśmę podczas pracy z nominalną prędkością bez obciążenia. Podczas transportu nadawy taśmy drgają i poruszają się z różnymi prędkościami. Przy badaniu należy uwzględnić wahania prędkości taśmy, wpływ wilgoci, kurzu czy też wpływ temperatury na pomiar, wpływ zakłóceń elektromagnetycznych z innych źródeł takich jak silniki elektryczne znajdujące się w sąsiedztwie czy inne elementy stalowe oraz pole magnetyczne kuli ziemskiej.

Badana taśma może mieć również nierówną powierzchnię nośną przez co transportowana nadawa może pozostać na taśmie, a przerwane linki mogą wystawać poza jej powierzchnię, co przeszkadza w ustabilizowaniu taśmy.

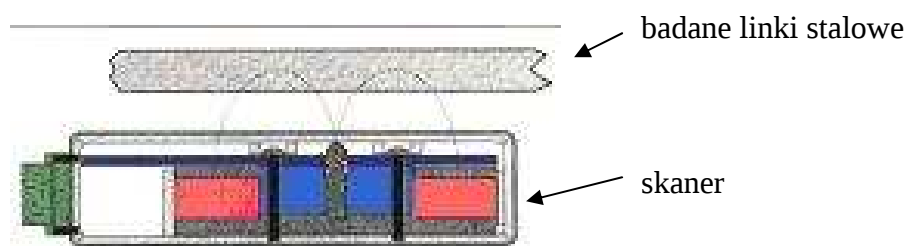
Szybki postęp w elektronice i przetwarzaniu sygnałów w latach 90. XX wieku pozwolił na rozwój systemu skanowania taśm przenośnikowych.

System BELT C.A.TTM składa się z czterech podstawowych elementów (rys. 4.9). Pierwszym z nich jest skaner umieszczony z jednej strony taśmy, która ma być skanowana. Drugim elementem jest szybki system zbierania danych (radiolokacji), trzecim jest zaawansowane oprogramowanie i sprzęt komputerowy do przetwarzania danych. Czwartym elementem jest zespół kopiowania, skanowania oraz analizy wyników.

Głowica skanera składa się z 66-centymetrowych modułów (od 1 do 4 sztuk), które tworzą formę prostokątnej jednostki ułożonej na całą szerokość taśmy. Umieszczenie urządzenia pod lub nad taśmą zajmuje w przybliżeniu około 15 minut. Taśma przenośnika może być skanowana tylko po jednej stronie. Stalowe linki zawulkanizowane w gumie przechodzą w odległości 3-8 cm od skanera (rys. 4.10).



Rys. 4.9. System BELT C.A.T™ [34]



Rys. 4.10. Widok skanera BELT C.A.T™ [34]

Zaburzenia sygnału spowodowane drganiem taśmy są filtrowane przez skaner. Zasada działania bazuje na pomiarach zmian oporu magnetycznego w stalowych linkach. Dzięki temu możemy precyzyjnie wykryć korozję i pęknięcia linek. Oprócz czujników strumienia magnetycznego, każdy pojedynczy moduł skanujący zawiera zespół obwodów elektrycznych służących do normalizowania i dopasowywania sygnałów, jak również do próbkowania i kwantyzacji. Otrzymane wyniki cyfrowe są przesyłane do systemu gromadzenia danych (radiolokacji) i systemu rejestrującego z dużą prędkością poprzez zastosowanie łącza światłowodowego [34].

System zbierania danych (rys. 4.11) składa się z systemu komputerowego z wbudowanym ciekłokrystalicznym ekranem dotykowym, umieszczonym w obudowie podobnej do komputera przenośnego. Zawiera on również system zasilania dla modułów skanera.

System podczas normalnej pracy jest w stanie wykryć uszkodzenia o długości szczeliny ok. 5 mm, jak również małe pojedyncze pęknięcia drutów dzięki zastosowaniu funkcji „track” i „hold mode”. Dla taśmy poruszającej się z prędkością 7 m/s i o szerokości 2640 mm, system radiolokacji i system rejestracji zbiera 750 000 próbek na sekundę.



Rys. 4.11. Sprzęt komputerowy do rejestracji danych [34]

Do zapisu pomiarów użyty został elektroniczny układ, który rejestruje dane i dodatkowo zapisuje je na dwu taśmach magnetycznych, zapewniając dodatkową kopię wyników. Wyniki z pomiarów zbierane są podczas dwóch pełnych cykli pracy przenośnika po to, aby można było porównać odczyty zarejestrowane sygnały pochodzące od uszkodzeń. W wyniku skanowania taśmy przenośnika uzyskujemy około 4 miliardów próbek danych. Taśma zawierająca dane z procesu skanowania jest przegrywana do komputera w celu przeprowadzenia analiz. Każda próbka danych, która została zebrana podczas skanowania jest analizowana oraz przetwarzana za pomocą specjalnych metod i algorytmów filtrowania. System rejestruje jedynie takie zdarzenia dotyczące stalowych linek, które uważane są za wady. Sygnały filtrowane są również z uwagi na występujące zakłócenia od silników napędowych, drgań taśmy czy wstępnego namagnesowania linek. Przetworzone wyniki są automatycznie drukowane w kolorze jako raport z badania i mogą być dodatkowo zarejestrowane na kasie wideo w celach archiwalnych.

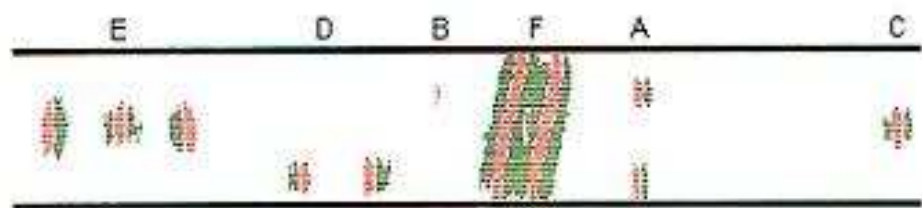
Raport z badania składa się z dwu części:

- kolorowego graficznego rejestru z dwóch przejazdów badanej taśmy,
- szczegółowego graficznego przedstawienia każdej wady stalowych linek dla każdego segmentu osobno.

W tej metodzie gumę taśmy przenośnikowej traktujemy jako przezroczystą i dlatego też jej stan nie jest uwzględniany w raporcie z badania.

Jeżeli podczas badania nie zostaną zarejestrowane żadne uszkodzenia linek, w wydruku z badania ujrzymy biały pas. Jeśli zostaną wykryte, zobaczymy wady lub anomalie w postaci kolorowych znaków. Kolor czerwony wskazuje na wzrost ubytku przekroju metalicznego stalowych linek.

System ten wykrywa również stan korozyjny stalowych linek. Jeśli jest on niewielki zostanie zarejestrowany (rys. 4.12) jako szereg zielonych kropek w kierunku poziomym. Jeśli korozja jest znacząca, na defektogramie pojawiają się czerwone kropki.



Rys. 4.12. Wynik z badania (defektogram) [32]

System skanujący BELT C.A.T.TM pozwala również na dokładną analizę połączeń, ich rodzajów, długości i kąta uskoku linek, lokalizację końca linek w celu weryfikacji, czy połączenia zostały poprawnie wykonane. Na rysunku 4.12 oznaczenie F pokazuje jednostopniowe połączenie.

Po zainstalowaniu systemu na przenośniku taśmowym powinno zostać wykonane wstępne skanowanie taśmy. Pierwsze skanowanie taśmy będzie podstawowym wzorcem dla kolejnych badań przeprowadzanych w przyszłości.

System BELT C.A.T.TM stał się wartościowym narzędziem diagnostyki, ponieważ dostarcza informacji o stanie technicznym taśmy przenośnikowej. Wykryte uszkodzenia linek, pęknięcia, korozja czy wreszcie zmiany występujące w połączeniach, spowodowane zmęczeniem materiału, mogą zostać poddane naprawie lub wymianie.

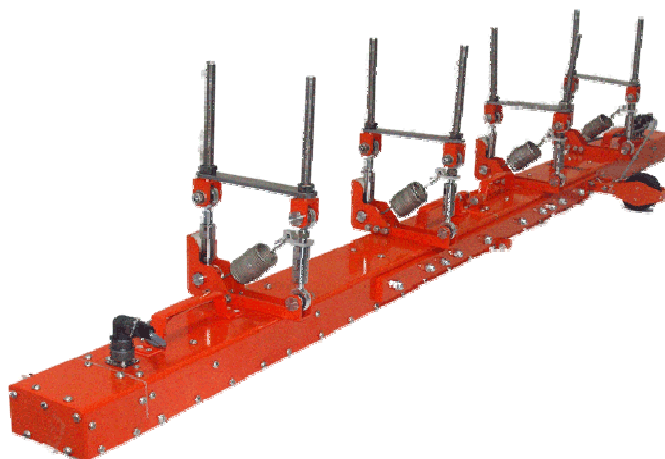
5.4 System Introcon [30]

Kolejnym systemem diagnostycznym, wykorzystującym metodę badań nieniszczących taśm z linkami stalowymi, jest system Introcon opracowany przez firmę Intron Plus, LTD. Metoda ta wykorzystuje do pomiarów prądy wirowe. Jest używana w górnictwie, cementowniach, portach morskich i stalowniach, a więc wszędzie tam, gdzie pracują przenośniki taśmowe. System ten jest bardzo uniwersalny i może być również stosowany do badań na obszarach zagrożonych wybuchem. System Introcon może wykryć takie uszkodzenia jak: pęknięcia drutów, wżery korozyjne, ale również możemy znaleźć miejsca połączeń drutów i określić odległości między przerwanymi drutami. Do kontroli nie jest wymagane żadne specjalne przygotowanie. Skaner instaluje się na przenośniku łatwo i szybko (rys. 4.13).



Rys. 4.13. Instalacja Introcon na przenośniku taśmowym [30]

Monitorowanie taśmy jest możliwe podczas normalnej pracy. W skład systemu Introcon wchodzi urządzenie odczytujące (skaner) i przenośne urządzenie zapisujące dane. Skaner ma konstrukcję segmentową (rys. 4.14). Dzięki temu możemy go stosować do badania taśmy o szerokości w przedziale od 600 ÷ 3000 mm. Prędkość taśmy podczas badania może wynosić od 0 ÷ 4 m/s. Skaner w zależności od szerokości badanej taśmy może ważyć nawet do 35 kg. Zamontowaną na przenośniku taśmowym głowicę przedstawiono na rysunku 4.16.



Rys. 4.14. Urządzenie odczytujące (skaner) [30]

Głowica skanująca i jednostka przetwarzająca odczytane wartości sprzęgnięte są ze sobą. Jednostka podstawowa zbiera i przetwarza sygnały ze skanera. Jest ona zasilana z baterii co umożliwia pracę urządzenia na obiekcie, gdzie nie ma możliwości dostępu do sieci energetycznej. Dane są zapisywane w pamięci jednostki przetwarzającej (rys 4.15) i mogą być w późniejszym czasie pobierane i edytowane na ekranie monitora.



Rys. 4.15. Jednostka przetwarzająca sygnał [30]

Oprogramowanie WINCOM pozwala na pobieranie i przetwarzanie danych testowych oraz przygotowanie sprawozdania. W trosce o klienta firma Intron Plus, LTD szkoli swoich klientów w obsłudze aparatury pomiarowej i gwarantuje konsultację drogą internetową.

Podstawowe dane techniczne [30]:

Szerokość badanej taśmy	600 ÷ 4000 mm
Grubość badanej taśmy	10 ÷ 50 mm
Średnica linek stalowych	3 ÷ 15 mm
Liczba linek stalowych w taśmie	50 ÷ 200
Prędkość taśmy podczas testu	0 ÷ 4 m/s
Czułość wykrycia uszkodzonych linek	1 uszkodzona linka
Wymiary skanera (dł. x wys. x szer.)	(1300÷3500) x 70 x 200 mm
Masa skanera	8 ÷ 35 kg
Wymiary / masa urządzenia zapisującego dane	85 x 35 x 217 mm / 620 g



Rys. 4.16. System Introcon po zamontowaniu na przenośniku taśmowym [30]

4.5. System Mobile Eye-Q

Jednym z bardziej popularnych systemów monitorowania i diagnozowania jest system Eye-Q. Urządzenie firmy FennerDunlop bazuje na pomiarze zmian pola magnetycznego rdzenia taśm przenośnikowych z linkami stalowymi (rys 4.17). Urządzenie to dzięki swojej modułowej budowie pozwala na szybkie pomiary zarówno w terenie jak i w oddziale

regeneracji taśm dla szerokiego zakresu prędkości od 0,5 do 7 m/s oraz taśm o szerokości pomiędzy 800 a 2400 mm [4, 26].

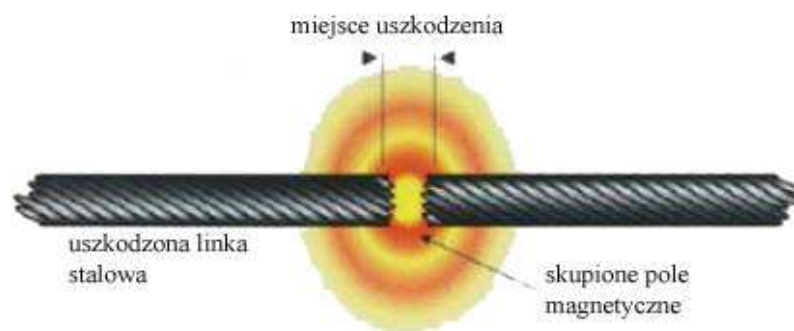
Informacje z dokonywanego pomiaru są pokazywane w czasie rzeczywistym na ekranie monitora komputera przenośnego. System jest tak skonfigurowany, żeby w przypadku wykrycia uszkodzenia mogącego spowodować awarię, zatrzymać przenośnik, aby można było łatwo zlokalizować uszkodzenie.

System Mobile Eye-Q ma pięć poziomów alarmów od 1 do 5. Poziom pierwszy odpowiada jednej pękniętej lince, poziom piąty odpowiada większej liczbie pękniętych linek i wówczas zatrzymywany jest przenośnik.

Mobilny system Eye-Q obejmuje sześć elementów (rys. 4.20) [4]:

1. zasilacz 230V,
2. listwa magnetyczna 24-ro kanałowa (rys 4.18),
3. enkoder do pomiaru prędkości taśmy z dokładnością do 0,5 % (rys 4.19)
4. rejestrator DL-200S z interfejsem kart typu PCMCIA, który pozwala na rejestrację danych na przenośnym dysku oraz na wprowadzenie do systemu podstawowych informacji za pomocą panelu dotykowego z wyświetlaczem ciekłokrystalicznym,
5. przetwornik NK MS2 do przetwarzania i kodowania sygnału analogowego z listwy magnetycznej i rejestratora DL-200S,
6. listwa magnesu stałego, wykonanego z czystego ferrytu służąca do namagnesowania rdzenia taśmy linkowej bez powiązania z systemem żadnymi połączeniami (po wykonaniu magnesowania może być zdjęta z przenośnika) [4].

Aby system działał poprawnie, do jego zasilania potrzebny jest mały mobilny generator, przenośny komputer do uruchomienia oprogramowania i drukarka do drukowania wykresów.

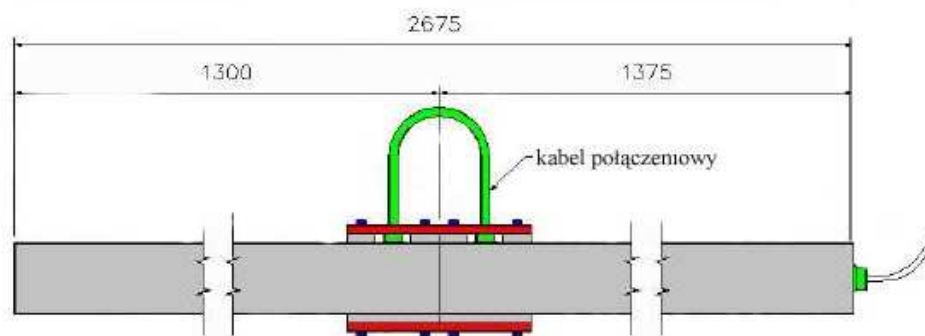


Rys. 4.17. Pojedyncza namagnesowana linka stalowa z pokazanym polem rozproszenia [26]

Wielkość zapisanego sygnału jest zawsze proporcjonalna do liczby zerwanych lub uszkodzonych linek. System jest łatwy w użyciu i może być instalowany na większości przenośników w ciągu kilku minut. Skanowanie taśmy jest wykonywane z normalną prędkością roboczą.

Magnesy mocujemy po obu stronach taśmy przenośnika w odległości $25 \div 50$ mm od powierzchni taśmy. Najlepiej jest wybrać takie miejsca, gdzie nie ma zbyt dużych drgań.

Do skanowania taśm o szerokości z zakresu $800 \text{ mm} \div 1200 \text{ mm}$ używana jest jedna sekcja magnesów, a do szerokości z zakresu $1200 \text{ mm} \div 2400 \text{ mm}$ dwie sekcje.



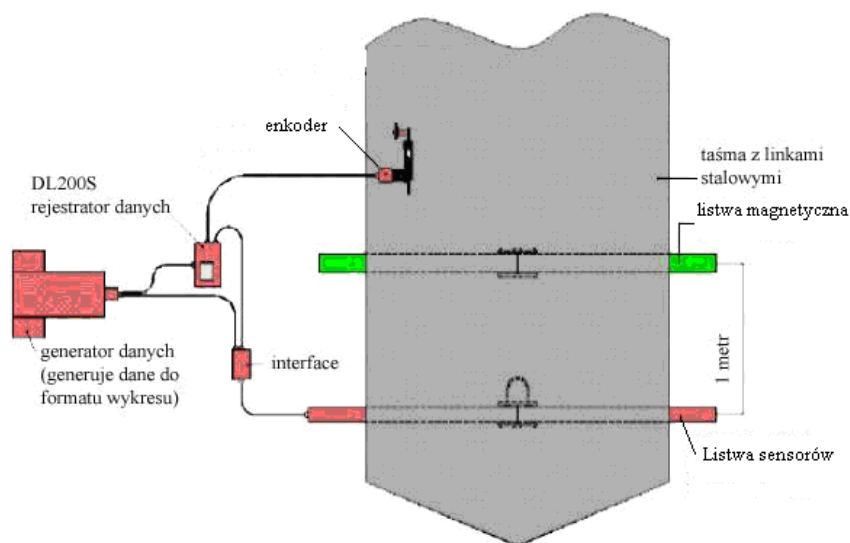
Rys. 4.18. Sensor mierzący poziom rozproszenia magnetycznego [26]

Dwie sekcje matryc są łączone ze sobą w sposób mechaniczny, następnie sprzęgane ze sobą za pomocą połączenia kablowego. Sensory mierzące poziom rozproszenia magnetycznego muszą być oddalone od listwy magnesu stałego o jeden metr (rys. 4.20).



Rys. 4.19. Enkoder [41]

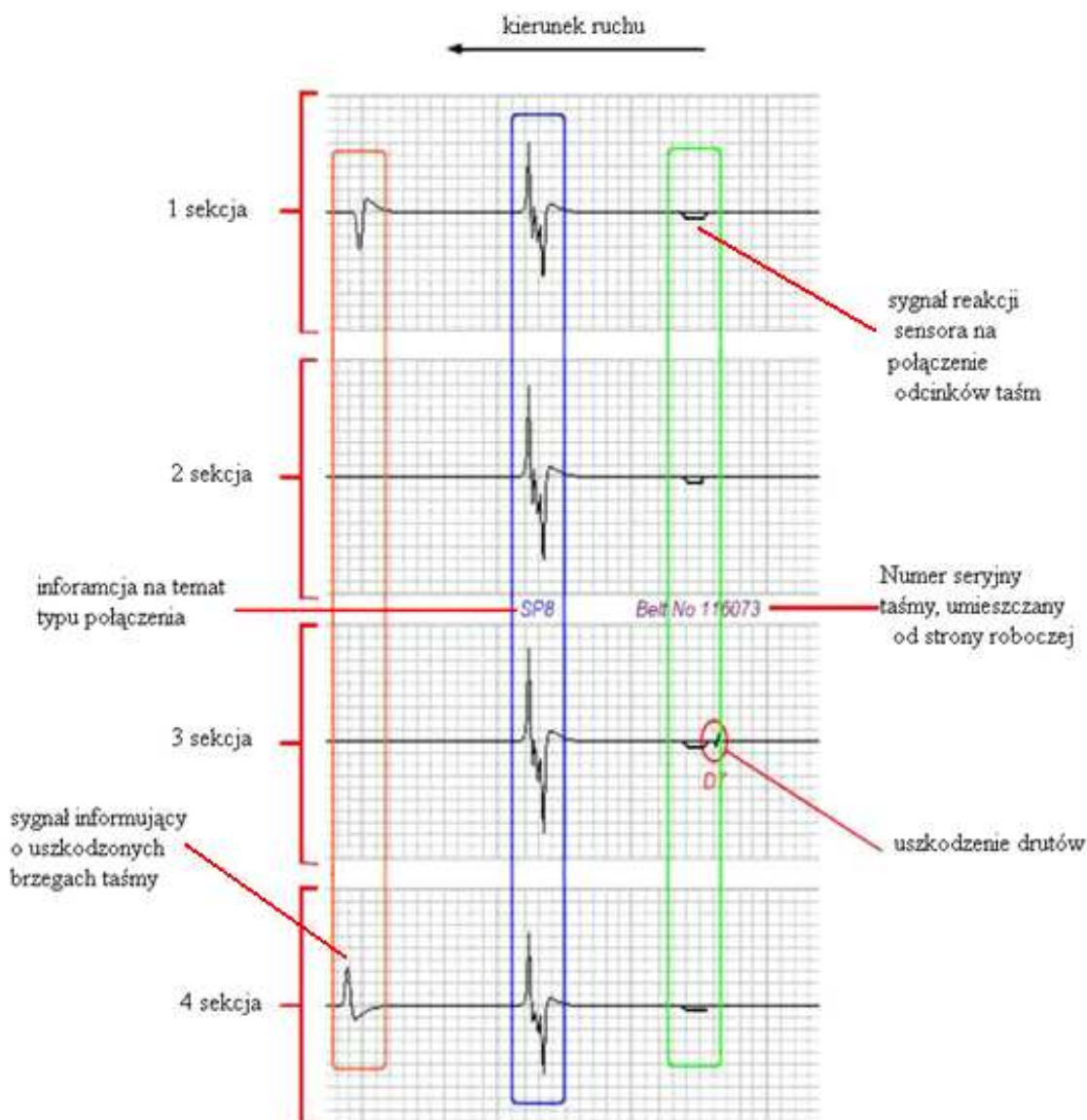
Enkoder, (rys. 4.19) czujnik położenia może być montowany gdziekolwiek w strukturze przenośnika, z zachowaniem kontaktu koła z ruchomą taśmą. Sygnał wygenerowany przez koło enkodera daje informację o prędkości przenośnika taśmowego oraz pozwala na dokładną lokalizację uszkodzonych obszarów.



Rys. 4.20. Schemat budowy Systemu Eye-Q

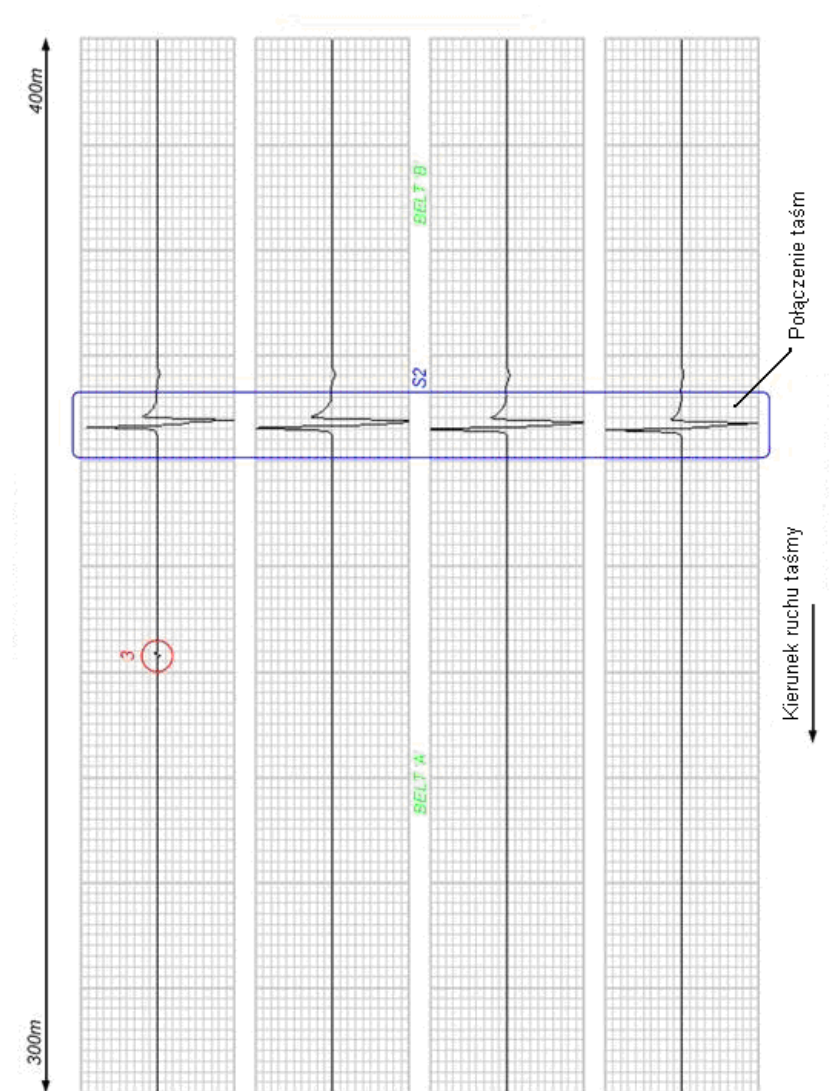
Przed przystąpieniem do pomiaru należy wstępnie namagnesować linki w taśmie przenośnika. Zapis skanowania taśmy następuje po 2 lub 3 pełnych przejściach. Przejście taśmy zostaje zarejestrowane na karcie pamięci DL200S. Dane z rejestratora są przenoszone do portu PCMCIA przenośnego komputera. Odpowiednie oprogramowanie konwertuje zarejestrowane dane do formatu wykresu w ciągu kilku sekund. Wykresy mogą być

drukowane w całości lub oglądane na ekranie monitora z wydrukowaniem jedynie interesującego nas fragmentu.



Rys. 4.21. Przykładowy wynik badania z systemem Eye-Q

Na rysunku 4.21 przedstawiono przykładowy wynik badania systemem Eye-Q. Rysunek ten przedstawia taśmę o szerokości 2000 mm i o długości 100 m. Sygnał rejestrowany jest w czterech sekcjach, z których każdy kanał obejmuje $\frac{1}{4}$ szerokości taśmy. Dzięki temu rozwiązaniu zlokalizowanie uszkodzonego obszaru i ewentualna naprawa jest łatwiejsza. Miejsce łączenia jest wygenerowane na całej szerokości taśmy (rys. 5.22).



Rys. 4.22. Sygnał wygenerowany przez połączenie odcinków taśmy przenośnikowej

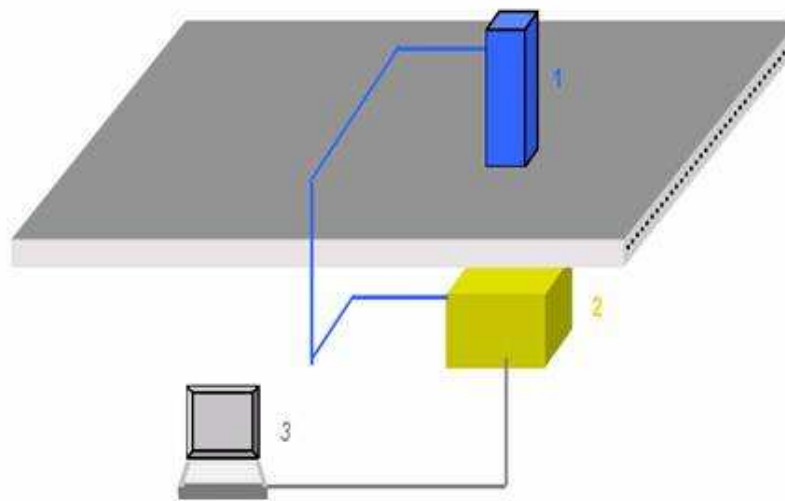
4.6. System X-RAY [26, 39]

Kolejnym systemem do diagnostyki taśm przenośnikowych jest system X-Ray. Jest to propozycja opracowana przez firmę Apex Fenner wykorzystująca promienie rentgena do prześwietlenia stalowych linek zawulkanizowanych w taśmie (rys. 4.23). System wykorzystuje pulsujący generator promieni rentgenowskich, które przechodząc przez taśmę przenośnikową, są odbierane przez specjalną kamerę wideo wykorzystywaną jako odbiornik (rys. 4.24). Komputer zmienia dane wyświetlane na ekranie monitora w całości w ciągu kilku sekund. Jakikolwiek uszkodzenie znalezione przez system Eye-Q może być potwierdzone przez prześwietlanie systemem X-Ray. Obraz ten może być oglądany i wstawiany do różnego rodzaju raportów.

Zastosowanie technologii promieni rentgena pozwala podejmować decyzje o poziomie uszkodzeń oraz gwarantuje bezpieczną pracę przenośnika. System X-Ray (rys. 4.25) stanowi uzupełnienie procesu diagnostycznego realizowanego systemem Eye-Q.

System może wykrywać wiele szczegółów w taśmie przenośnikowej, takich jak:

- uszkodzone linki,
- korozję,
- zerwane linki,
- typ połączenia.



Rys. 4.23. Zasada działania X-Ray [38]

1 – X-Ray, 2 – kamera, 3 – komputer.



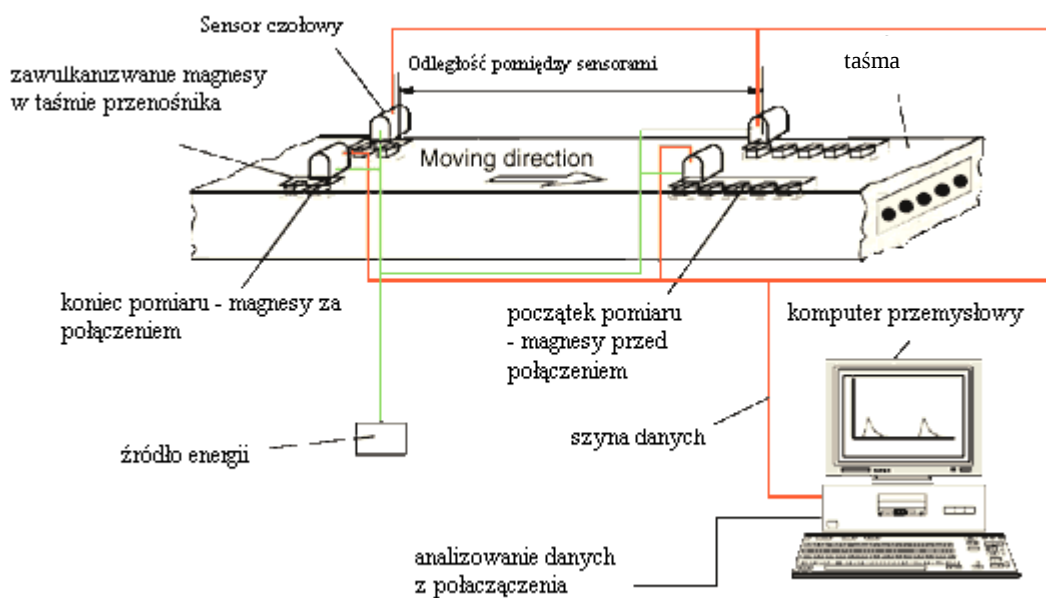
Rys. 4.24. Kamera systemu X-Ray [39]



Rys. 4.25. Zestaw do badania taśm przenośnikowych [39]

4.7. System Pheno-care [32, 33]

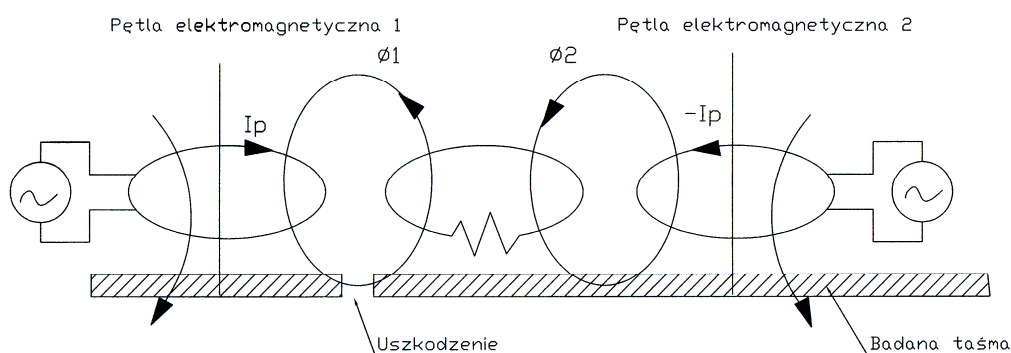
System Pheno-care SC jest jednym z najnowszych systemów do diagnozowania miejsc połączeń taśm transporterowych. Schemat budowy przedstawiony został na rysunku 4.26.



Rys. 4.26. Schemat budowy systemu Pheno-care SC [32]

Połączenia występujące w taśmach przenośnikowych są ich najsłabszymi miejscami. Każdy odcinek taśmy musi zostać połączony bardzo starannie, tak, aby stanowiło to całość. Wydłużanie się połączenia może być początkiem jego zniszczenia. System Pheno-care (TM) SC został zaprojektowany w taki sposób, aby analizować wydłużenie połączenia.

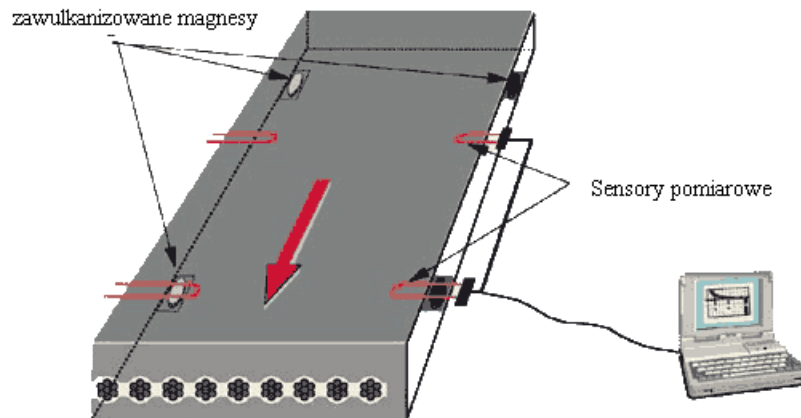
Do pomiarów wykorzystuje się małe magnesy zatopione w taśmie przed i za połączeniem oraz sensory, które są umieszczone nad taśmą w równych odstępach od siebie. W systemie Phenocare wykorzystywane jest do pomiarów pole rozproszenia przedstawione na rysunku 4.27 [32].



Rys. 4.27. Pole rozproszenia [32]

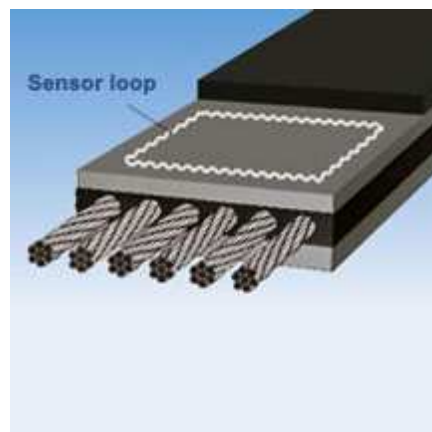
Dużą zaletą opisywanego systemu diagnostycznego jest możliwość wykonywania pomiarów podczas normalnej pracy pod pełnym załadunkiem. Jeżeli system wykryje wydłużenie połączenia, to przenośnik taśmowy zostanie zatrzymany, aby zapobiec groźnemu uszkodzeniu taśmy. Dzięki zastosowaniu w strukturze taśmy sensorów, można zidentyfikować każde połączenie, a system reaguje nawet na niewielkie wydłużenie. System diagnostyczny odporny jest również na warunki pracy przenośnika takie, jak: kurz, wibracje i ekstremalne zmiany temperatur. System diagnostyczny ma bardzo dobre właściwości, w tym częstotliwość próbkowania co 1 mm [32, 33].

System Pheno-care SC składa się z sensorów i komputera przemysłowego. Dane dostarczone z sensorów mogą być przesyłane poprzez internet lub przez specjalny modem. Istnieje również możliwość podłączenia kilku systemów pomiarowych do jednego komputera (rys. 4.28).



Rys. 4.28. Połączenie systemu pomiarowego z komputerem [32, 33]

Taśma przenośnika oprócz sensorów służących do badania stanu połączenia taśmy ma również wewnątrz zawulkanizowane transpondery (rys. 4.29), które mają zakodowane informacje na temat taśmy przenośnika, takie jak: numer seryjny oraz datę produkcji.



Rys. 4.29. Zawulkanizowana pętla transpondera w taśmie [32, 33]

Transpondery zawulkanizowane w równych odstępach w taśmie spełniają dodatkowo funkcję informacyjną w przypadku rozcięcia taśmy. Pętla transpondera zostaje wtedy przerwana i wysyła informacje o uszkodzeniu odcinka taśmy. Dzięki możliwości lokalizacji uszkodzenia można w szybki sposób odnaleźć i naprawić usterkę. Dodatkowym ułatwieniem jest zainstalowanie kamer umożliwiających badanie wizualne całej długości taśmy (rys. 4.30).



Rys. 4.30. Kamera służąca do obserwacji taśmy [32, 33]

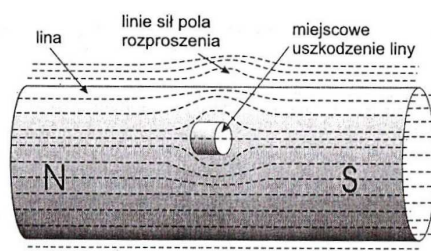
5. Opis standardowej metody oceny stanu technicznego taśm z linkami stalowymi

Obecnie jedną z najbardziej zaawansowanych metod jest defektoskopia magnetyczna, która pozwala na ocenę stanu linek w trakcie normalnej eksploatacji, a uzyskiwane wyniki badań gwarantują jej pełną użyteczność. W procesie diagnozowania zaistniała możliwość identyfikacji uszkodzeń taśm (takich jak złomy zmęczeniowe drutów, przerwanie ciągłości spletek, wady fabryczne, zużycie korozyjne odspojonych linek) i obserwacji połączeń taśm. Identyfikacja tych wad i uszkodzeń umożliwia eliminację zużytych fragmentów taśmy oraz ich naprawę. Ocena stanu taśm przenośnikowych z linkami stalowymi za pomocą głowicy pomiarowej sprzężonej z defektografem umożliwia ilościową interpretację wielkości ubytku przekroju nośnego linek [22, 17].

Metoda magnetyczna badania linek stalowych zawulkanizowanych w gumie polega na przesuwaniu taśmy z linkami w stałym polu magnetycznym, rejestrowaniu sygnału elektrycznego będącego funkcją zmiany pola magnetycznego wywołanej uszkodzeniem liny oraz obliczeniu na tej podstawie zużycia liny.

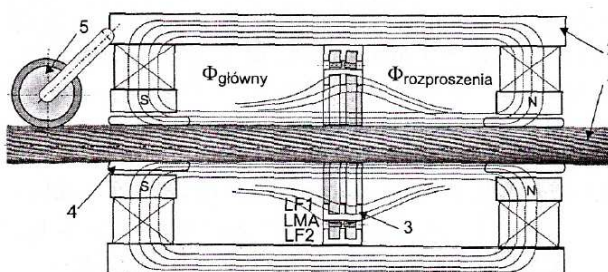
Polska metoda opracowana w Katedrze Transportu Linowego AGH wykorzystuje zjawisko zaburzenia linii sił stałego pola magnetycznego wokół namagnesowanego obiektu ferromagnetycznego z uszkodzeniami znajdującymi się w jego strukturze. Metoda ta

określana jest mianem metody wykorzystującej magnetyczny strumień rozproszenia (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Magnetyczne pole rozproszenia wokół uszkodzenia w materiale ferromagnetycznym [22]

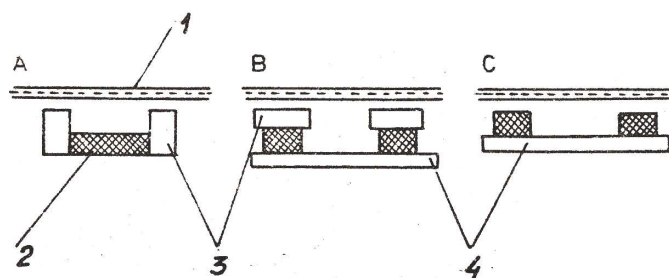
Na odcinku taśmy z linkami stalowymi namagnesowanym stałym polem magnetycznym, między nabiegunkami usytuowany jest czujnik indukcyjny – cewka pomiarowa. W momencie przesuwania taśmy z uszkodzeniem, następuje chwilowa zmiana użytecznego strumienia magnetycznego skojarzonego z cewką (rys. 5.2). W efekcie w zainstalowanej w głowicy pomiarowej cewce indukuje się siła elektromotoryczna. Jej wartość szczytowa jest funkcją uszkodzenia, a precyzyjniej, jest wprost proporcjonalna do miejscowej zmiany przekroju ferromagnetycznego liny.



Rys. 5.2. Schemat obwodu magnetycznego i głowicy pomiarowej do badania lin stalowych [22];

**1 - lina stalowa, 2 - obwód magnetyczny, 3 - czujniki pomiarowe,
4 – prowadzenie, 5 - czujnik drogi**

Z defektoskopii magnetyczną związanych jest kilka pojęć. Jednym z nich jest obwód magnetyczny głowicy pomiarowej. Obwód magnetyczny składa się z magnesów trwałych, zwory magnetycznej, nabiegunków i linek stalowych zwulkanizowanych w gumie, która zamyka obwód magnetyczny oraz otaczającego wnętrza powietrza (rys. 5.3).



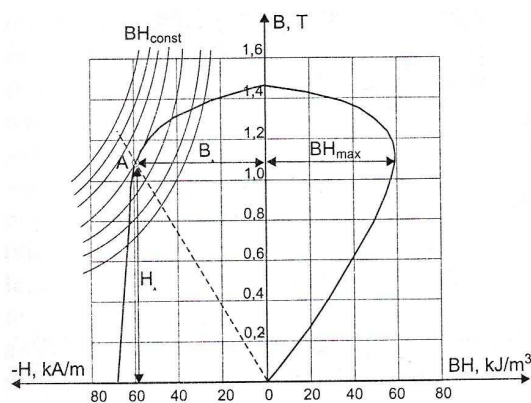
Rys. 5.3. Konfiguracja materiałów magnetycznych w obwodzie magnetycznym głowicy:
1- lina stalowa, 2 - magnes trwały, 3 – nabiegunnik, 4 - zwora magnetyczna [22]

Obwód magnetyczny buduje się tak, aby w jego elementach wartość indukcji magnetycznej była zbliżona do wartości indukcji nasycenia magnetycznego zastosowanego materiału (dla stali węglowej konstrukcyjnej ok. 2,1 T). Dzięki takiej konstrukcji obwodu możliwe jest uzyskanie we wnętrzu badanego obiektu indukcji magnetycznej o wartości od 1,4 do 1,6 T [22].

Źródłem pola magnetycznego są magnesy trwałe. Właściwości magnetyczne magnesów są określone na podstawie pętli histerezy. Dla odpowiedniego dobrania magnesu, który będzie zdolny do wytworzenia wymaganego strumienia magnetycznego w obwodzie magnetycznym głowicy pomiarowej musimy znać trzy parametry, mianowicie współczynniki przenikalności:

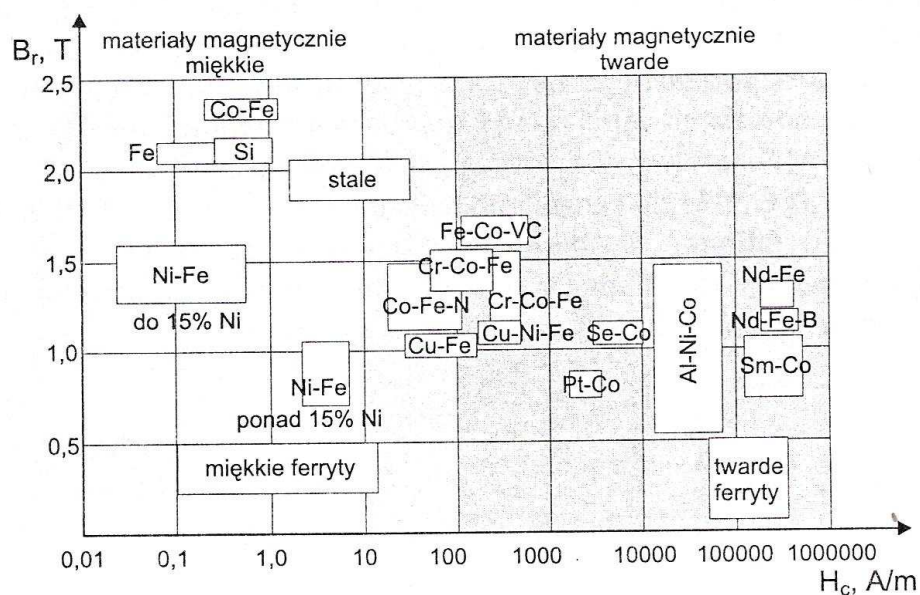
- **początkowej** μ_p określonej jako tangens kąta nachylenia krzywej magnesowania pierwotnego charakterystyki B-H
- **różniczkowej** μ_d określonej jako stosunek B/H liczony przy małych wartościach ΔH w każdym punkcie pierwotnej krzywej magnesowania
- **powrotnej** μ_r określony na głównej pętli histerezy w II ćwiartce od magnesowania charakterystyki B-H

Maksymalną dostępną energię magnesu można wyznaczyć z wykresu przedstawiającego wartość iloczynu $B \times H$ przedstawionego jako funkcję indukcji magnetycznej B, rysowanej w drugiej ćwiartce (rys. 5.4) [22].



Rys. 5.4. Metoda wyznaczania energii magnesu trwałego [22]

Najczęściej stosowanymi materiałami na magnesy trwałe są stopy lub spieki: Ne-Fe-B, Al-Ni-Co, Sm-Co (rys. 6.5). Magnesy z tych materiałów mają większą energię przypadającą na jednostkę objętości niż magnesy ferrytowe stosowane wcześniej. Dzięki zastosowaniu nowego typu materiałów na magnesy trwałe, nowoczesne głowice pomiarowe mogą być mniejsze i lżejsze. Dają możliwość uzyskania dużej wartości indukcji magnetycznej w badanej linii (np. wartości 1,4-1,6 T) [22].



Rys. 6.5. Materiały magnetyczne stosowane na magnesy trwałe [22]

Rolą magnesów trwałych jest wytworzenie stałego pola magnetycznego o odpowiedniej indukcji. Natomiast źródłem informacji o stanie technicznym liny są czujniki

pomiarowe umieszczone w głowicy pomiarowej. Uzyskiwany z czujników sygnał w postaci napięcia uzyskany podczas badania liny jest proporcjonalny do zmian jej przekroju.

W metodzie magnetycznej opracowanej przez pracowników AGH podstawowymi czujnikami pomiarowymi przy badaniu taśm z linkami stalowymi są zespoły czujników LF. Czujniki te działają zgodnie z drugim prawem Faradaya [22]:

$$E = -\frac{d\Phi_R}{dt} = -k * B_r * v [mV]$$

gdzie:

E [mV] – indukowana siła elektromotoryczna,

Φ_R [Wb] – część strumienia rozproszenia przetwarzanego przez czujnik,

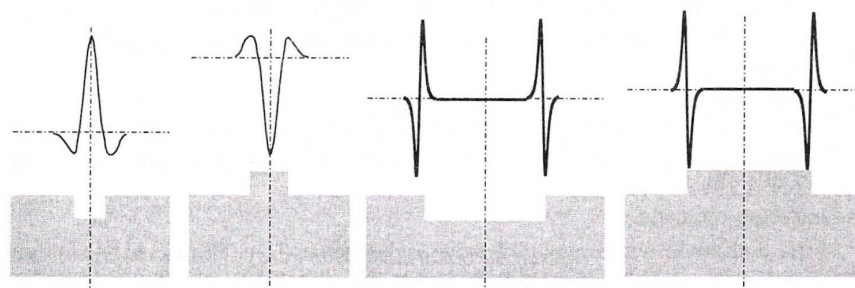
B_r [T] – składowa wektora indukcji,

v [m/s] – prędkość względna liny,

k - stała przeliczeniowa.

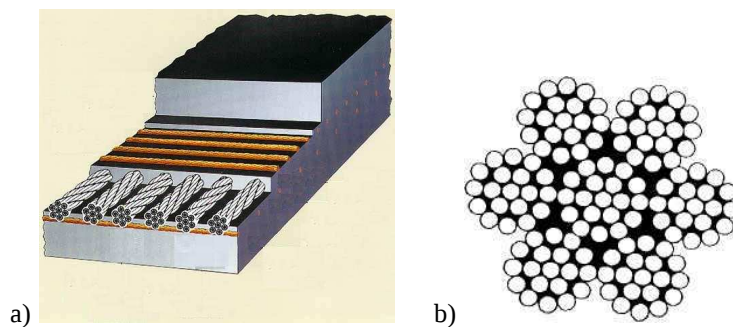
Czujniki indukcyjne zainstalowane w układach pomiarowych do badania linek stalowych w taśmach przenośnikowych wymagają przemieszczania się obiektu badanego względem nich.

Poniżej zamieszczono przykładowe kształty sygnałów generowanych przez czujniki pomiarowe.



Rys. 5.7 Kształt sygnałów generowanych przez różnicowe czujniki indukcyjne w zależności od charakteru uszkodzenia [22]

W taśmach z linkami stalowymi najczęściej używa się linki o punktowym styku drutów konstrukcji $1 \times (1 + 6 + 12) + 6 \times (1 + 6 + 12)$ (rys. 5.8). Ze względu na niewielką grubość taśmy również i te elementy posiadają niewielką średnicę, najczęściej od 4 do 8 mm.



**Rys. 5.8. a) Taśma z breakerami w postaci siatki stalowej [40];
b) Linka stalowa typu standard konstrukcji $1x(1+6+12)+6x(1+6+12)$ [16]**

Z punktu widzenia diagnostyki stanu taśm przenośnikowych procesy zużywania się linek stalowych mają znaczenie decydujące z uwagi na przenoszone obciążenie. Główne czynniki destrukcyjne to zużycie korozyjne i zmęczeniowe, a także wszelkiego rodzaju deformacje w układzie drutów i spletek. Procesy zużyciowe linek stalowych wiążą się przede wszystkim z takimi czynnikami jak postępujący ubytek przekroju nośnego spowodowanego korozją, jak również uszkodzeniami zmęczeniowymi drutów wchodzących w skład budowy linki. Procesy te w znacznej mierze zależą od stanu linek przed zawulkanizowaniem, rozrzutu własności sprężystych poszczególnych linek oraz jakości połączenia linek z gumą taśmy. Proces wulkanizacji uniemożliwia ocenę stanu technicznego metodami wizualnymi, dlatego też ogromną rolę odgrywają tutaj badania nieniszczące [22].

Badanie taśmy przenośnikowej może być wykonywane przy użyciu jednej, usytuowanej po jednej stronie taśmy, głowicy pomiarowej – ale tylko w warunkach pozycjonowania taśmy względem tej głowicy. Korzystniejszym jest jednak układ, w którym sygnał pomiarowy z każdej sekcji pomiarowej tworzony jest jako suma sygnałów z dwóch współbieżnych obwodów magnetycznych zamykających się po obu stronach taśmy na tym samym odcinku pomiarowym. Rozwiązanie takie eliminuje błędy wywołane drganiem taśmy.

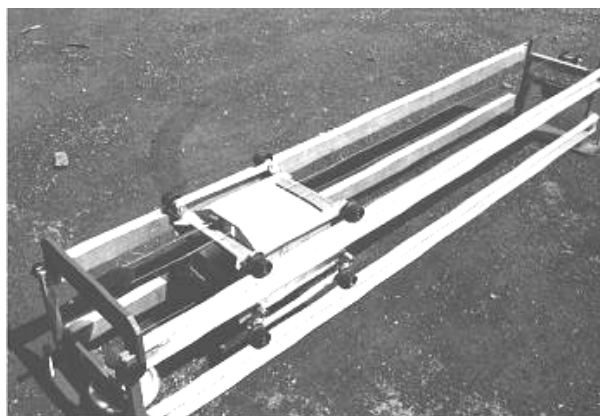
Analiza uszkodzeń prowadzona jest na podstawie rejestracji sygnału pomiarowego z jednej sekcji pomiarowej w objętym jej działaniem pasie taśmy przenośnika. Pełny cykl pomiarowy wymaga więc wykonania wielu pomiarów i analiz pokrywających pasami całą szerokość taśmy, przy czym każda z analiz obejmuje całkowitą długość taśmy. Badanie wykonuje się za pomocą głowicy pomiarowej GP9 (rys. 5.9, 5.10), którą trzeba zamontować na przenośniku taśmowym (rys. 5.11) [15, 16, 17, 24]. Pomiary z głowicy są rejestrowane na defektografie MD120 (rys. 5.12).

Analiza uszkodzeń w wybranym przekroju poprzecznym taśmy możliwa jest dopiero po wykonaniu pełnego cyklu pomiarowego na badanym ustroju nośnym. Wymaga to kojarzenia wyników z poszczególnych analiz cząstkowych i jest czasochłonna,

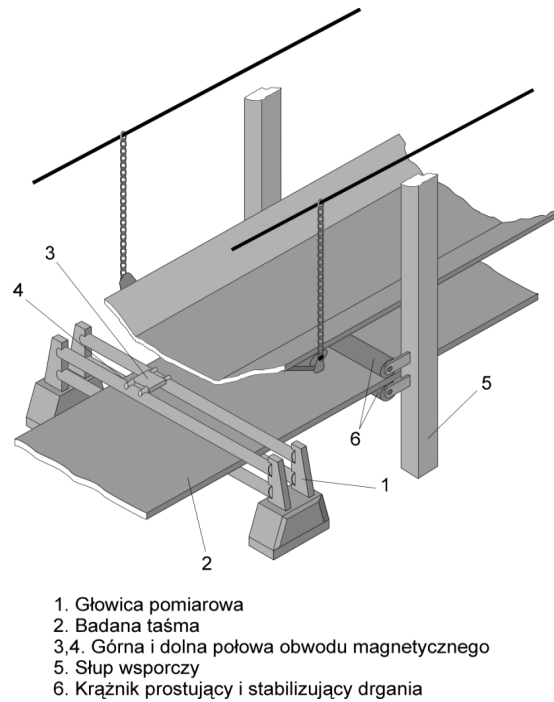
Poniżej przedstawiono aparaturę używaną standardowo podczas badań nieniszczących taśm z linkami stalowymi według metody opracowanej na AGH.



Rys. 5.9. Badanie linek stalowych taśmy przenośnikowej (głowica GP9)



Rys. 5.10. Widok głowicy pomiarowej GP9/2400



Rys. 5.11. Schemat montażu głowicy pomiarowej GP9 na przenośniku taśmowym [16]



Rys. 5.12. Widok rejestratora MD120 firmy Zawada NDT [36]

6. Opracowanie założeń systemu diagnostycznego CRU

Na podstawie informacji dotyczących stosowanych w świecie metod badań taśm przenośnikowych z linkami stalowymi wykonano zestawienie opisanych systemów diagnostycznych (tabela 6.1) z wyszczególnionymi charakterystycznymi cechami. W przypadku braku informacji odnośnie wymagania oznaczono to znakiem zapytania (brak informacji producenta).

W tabeli zamieszczono także informacje o systemie Ciągłej Rejestracji Uszkodzeń (CRU), opracowanym w ramach niniejszej pracy doktorskiej.

Poniżej przedstawiono założenia opracowywanego systemu monitorowania CRU. Dotyczą one:

- a) analizy przyrostu liczby uszkodzeń,
- b) ustalenia poziomu rejestracji sygnału,
- c) lokalizacji położenia w poprzek i wzdłuż taśmy (segmenty głowicy i enkoder),
- d) analizy sygnałów pochodzących od breakerów,
- e) rejestracji uszkodzeń pojawiających się równocześnie w całym przekroju,
- f) sygnalizacji i analizy wydłużenia połączenia taśmy (sieci neuronowe lub czas trwania sygnału),
- g) dokumentu z badania (defektogram),
- h) niwelacji wpływu prędkości na pomiar,
- i) częstotliwości próbkowania zapewniającej możliwość rejestracji sygnału przy prędkości taśmy maksymalnie 4 m/s,
- j) uniezależnienia sygnału od drgań poprzecznych taśmy.

Objaśnienie do tabeli 6.1:

— – niespełnione wymaganie

X – spełnione wymaganie

? – brak informacji

Tabela 6.1 Porównanie znanych systemów diagnostycznych taśm przenośnikowych.

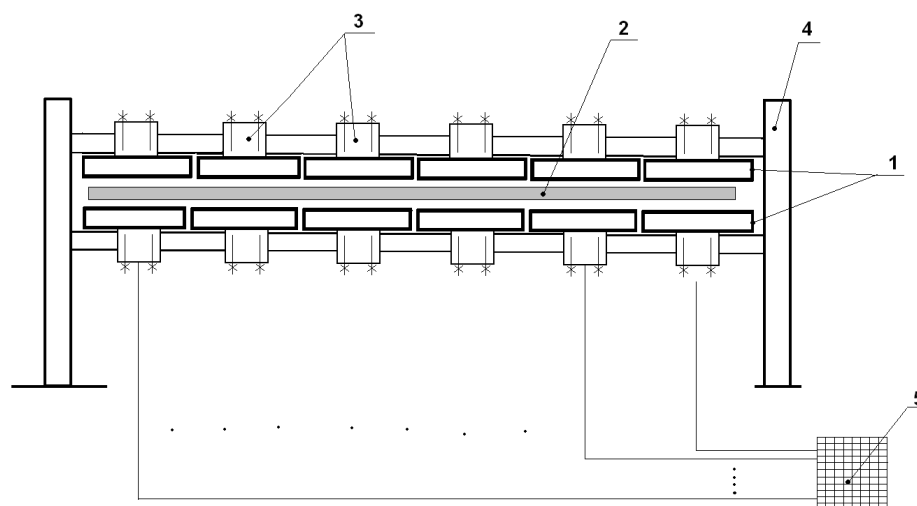
System Wymagania	Conti-Tronic	C.A.T Scanning	Introcon	Mobile EyeQ	Pheno-care SC	System CRU (AGH KTL)
Zliczanie liczby uszkodzeń między połączeniami	—	—	—	—	—	X
Poziom rejestracji	—	1 linka korozja	1 uszkodzona linka	min. 1 pęknięta linka (5 poziomów)	—	Pęknięta splotka (poziom regulowany), korozja
Lokalizacja położenia uszkodzenia	?	X	X	X	—	X (enkoder i sekcje głowicy)
Pęknięcia wzdłużne taśmy	X (zawulkanizowane chipy)	—	—	?	Transponder	X (jeśli są breakery w taśmie)
Uszkodzenia w całym przekroju taśmy	?	X	X	X	—	X
Wydłużenie połączenia	X (zawulkanizowane w połączeniu chipy)	?	X	Rentgen (przy v=0)	X (dokładna wulkanizacja wskaźników w połączeniu – taśmy bez linek)	X
Defektogram z badania	—	X (w kolorach)	X	X	—	X
Wpływ prędkości	Brak	—	?	Enkoder	V dowolna	Enkoder na rolce przenośnika
Częstotliwość próbkowania	?	750 kHz	?	?	?	min.1,5 kHz
Prędkość taśmy	?	7 m/s	0÷4 m/s	V robocza	6 m/s	~ 4 m/s
Zakres szerokości badanej taśmy		÷ 2640 [mm]	600÷3000 [mm]	800÷2400 [mm]	?	400÷ 2400 [mm]
Szerokość sekcji		660 [mm]	1300÷3500 [mm]	250 [mm]	—	400 [mm] Dwie sekcje
Wpływ drgań taśmy		X sprężenie magnetyczno-indukcyjne	?	—	—	X
Praca przy pełnym załadunku	—	—	X	?	X	X

b) Ustalenie poziomu rejestracji

W taśmie przenośnikowej występują różnego rodzaju uszkodzenia. Generują one podczas badania sygnały o różnej wartości. Przykładowo pojedyncze wady generują sygnał o wartości $80 \div 500$ mV, podłużne przecięcie taśmy $100 \div 500$ mV, a miejsce połączenia dwóch odcinków taśmy $2 \div 3$ V. Dlatego bardzo ważną rzeczą jest prawidłowy dobór poziomu rejestracji uszkodzeń. Na podstawie długoletnich badań prowadzonych w AGH wiadomym jest, że intensywność występowania pękniętych linek jest większa na brzegach taśmy i amplitudy tych sygnałów są znacznie większe, niż w innych miejscach taśmy. Dlatego też istotnym elementem budowanego systemu diagnostycznego jest możliwość doboru poziomu rejestracji dla każdej sekcji pomiarowej osobno [17].

c) Lokalizacja położenia uszkodzenia w poprzek i wzdłuż taśmy (segmenty głowicy i enkoder)

W tej metodzie została użyta zupełnie nowa głowica pomiarowa o konstrukcji segmentowej o nazwie GP9CRU (rys. 7.2). Liczba segmentów jest zależna od szerokości taśmy. Zasadniczą różnicą nowej metody w stosunku do poprzedniej jest to, że istnieje możliwość badania całej szerokości taśmy w jednym czasie, co wpływa znacząco na skrócenie czasu, jaki jest potrzebny do przebadania całej długości taśmy.

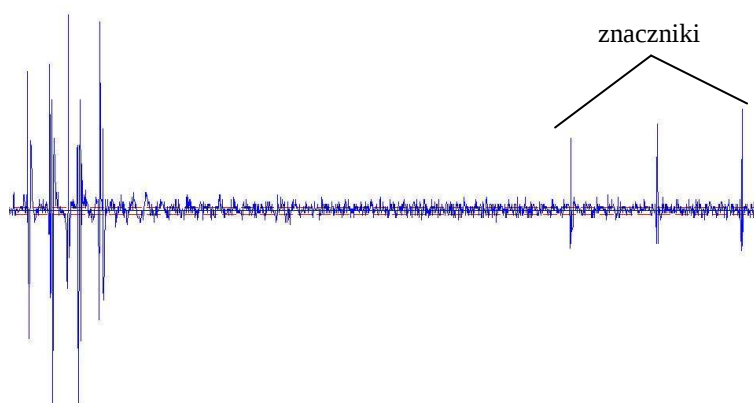


Rys. 6.2. Głowica segmentowa systemu monitorowania taśm (1 - połówki głowicy, 2 - taśma, 3 - segmenty głowicy, 4 - konstrukcja nośna, 5 - rejestrator uszkodzeń) [18]

Dzięki zastosowaniu głowicy segmentowej lokalizacja uszkodzeń jest bardzo łatwa. Segmenty głowicy dzielą taśmę na równe części, co umożliwia lokalizację poprzeczną uszkodzeń. Do zlokalizowania uszkodzeń wzdłuż taśmy służy zainstalowany na rolce przenośnika enkoder.

Bardzo ważnym elementem opracowywanej metody jest możliwość porównania wcześniejszych wyników badań z bieżącymi. Aby było to możliwe, system musi rozpoczynać pomiar zawsze w tym samym miejscu taśmy. Dlatego istnieje potrzeba zastosowania znaczników magnetycznych w badanej taśmie (rys. 6.3), pozwalających na rozpoczęcie kolejnego cyklu pomiarowego. W warunkach laboratoryjnych, jak i na rzeczywistym obiekcie zastosowano jako znaczniki magnesy trwałe o długości 3 cm oddalone od siebie o stałą odległość. Magnesy generują charakterystyczne sygnały, które w systemie diagnostycznym są informacją o rozpoczynającym się cyklu pomiarowym.

Na rysunku 6.3 przedstawiono elektroniczny zapis sygnałów generowanych przez znaczniki magnetyczne zawulkanizowane w taśmie przenośnikowej

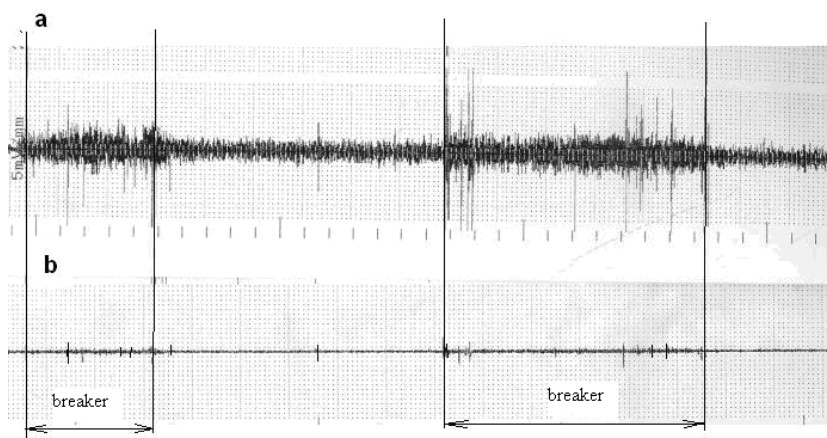


Rys. 6.3. Przebieg sygnału generowany przez znaczniki magnetyczne

d) Analiza sygnałów pochodzących od breakerów

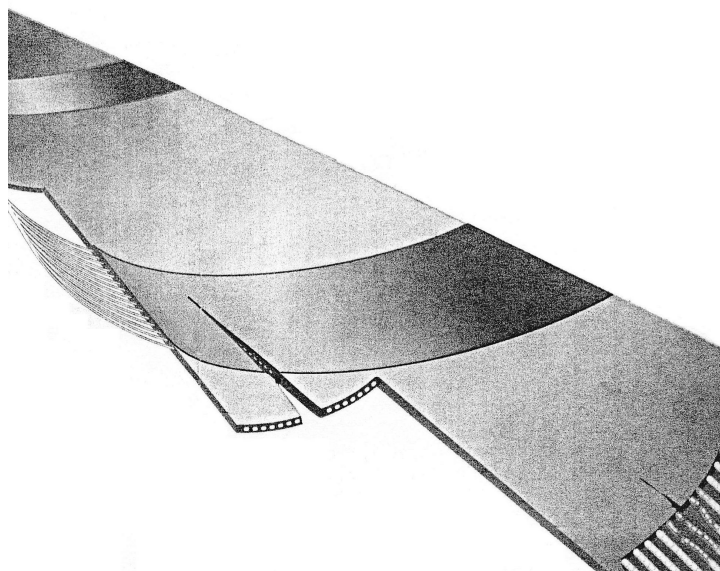
Breakery inaczej przekładki ochronne, są to odcinki ułożonych prostopadłe linek stalowych (rys. 6.7) o małej średnicy. Są one rozmieszczone w pasmach o szerokości 30 metrów (na przykład w KWK Marcel). Druty breakerów mają małą średnicę i usytuowane są prostopadłe do linek nośnych (na poprzek szerokości taśmy) występujących w strukturze taśmy przenośnikowej. Linki breakerów umieszczone są prostopadłe w stosunku do strumienia magnesującego stalowe linki nośne taśmy, co podczas badania taśmy tradycyjną metodą zakłócało rejestrowany sygnał.

W szczególnych przypadkach sygnał pochodzący od breakerów utrudnia jednak identyfikację uszkodzeń linek stalowych, które mogą się pojawić w miejscu ich występowania. Filtracja sygnału w połączeniu z odpowiednią czułością rejestracji pozwala na zmniejszenie wpływu breakera na sygnał diagnostyczny (rys.6.4 ozn. b).

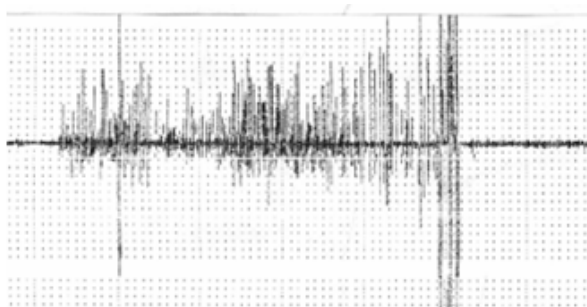


**Rys. 6.4. Zarejestrowany sygnał z badania taśmy z breakerami
(a - sygnał przed filtracją, b - sygnał po filtracji).**

W warunkach przemysłowych bardzo łatwo o uszkodzenie wzdłużne taśmy. Na skutek przecięcia wzdłużnego taśmy (rys. 6.5) następuje uszkodzenie siatki breakera. Skutkiem rozerwania siatki breakera jest zmiana sygnału diagnostycznego (rys. 6.6).

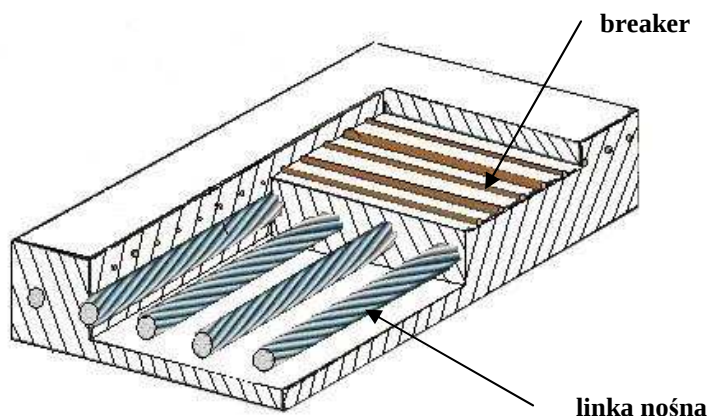


**Rys. 6.5. Wzdłużne rozcięcie taśmy przenośnika taśmowego
wraz z uszkodzonym breakerem**



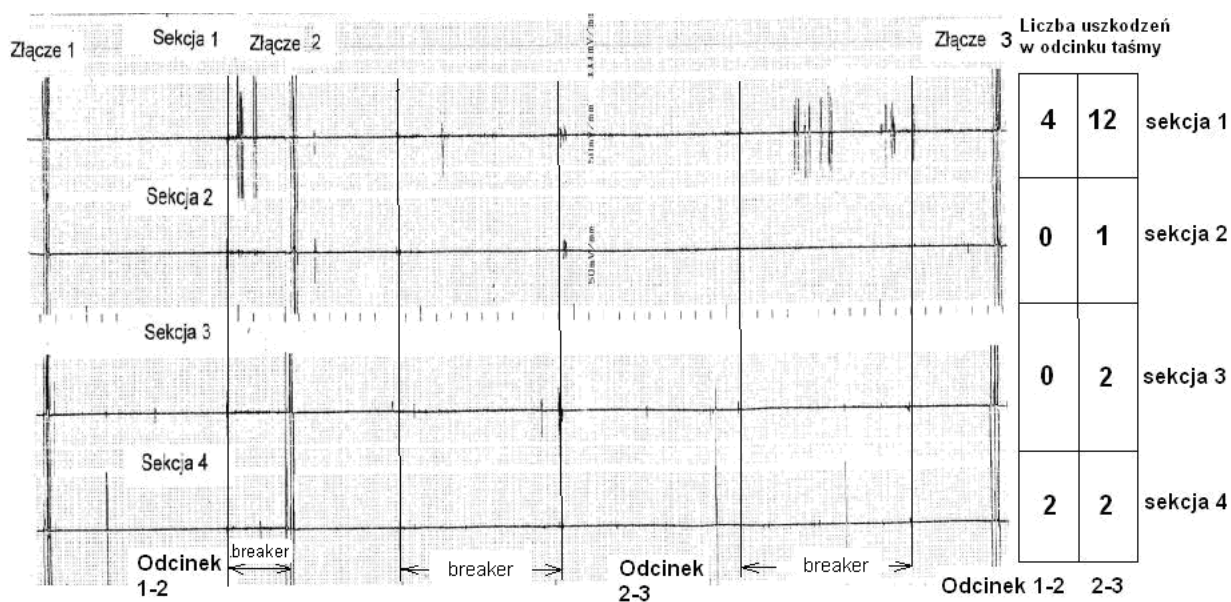
Rys. 6.6. Sygnał informujący o zerwanych drutach breakera

Pojawienie się takiego sygnału jest ważną informacją dla użytkownika pozwalającą na natychmiastowe zatrzymanie przenośnika taśmowego i usunięcie zaistniałej awarii poprzez zawulkanizowanie przeciętego, przez spadającą nadawę, odcinka taśmy. Fakt pojawienia się takiego sygnału pochodzącego od pękniętych breakerów jest wykorzystany do budowy systemu monitoringu stanu warstwy gumowej taśmy.



Rys. 6.7. Taśma z breakerami w postaci siatki stalowej typu fleximat

Poniżej zamieszczono fragment defektogramu z zarejestrowanymi sygnałami pochodzącymi od pękniętych drutów oraz wynik ich zliczenia w poszczególnych sekcjach pomiarowych i kolejnych odcinkach taśmy (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Przykładowy wynik badania (dektogram) z zarejestrowanymi pęknięciami linek stalowych (z prawej strony wynik zliczania uszkodzeń w poszczególnych sekcjach i w kolejnych odcinkach badanej taśmy) [18]

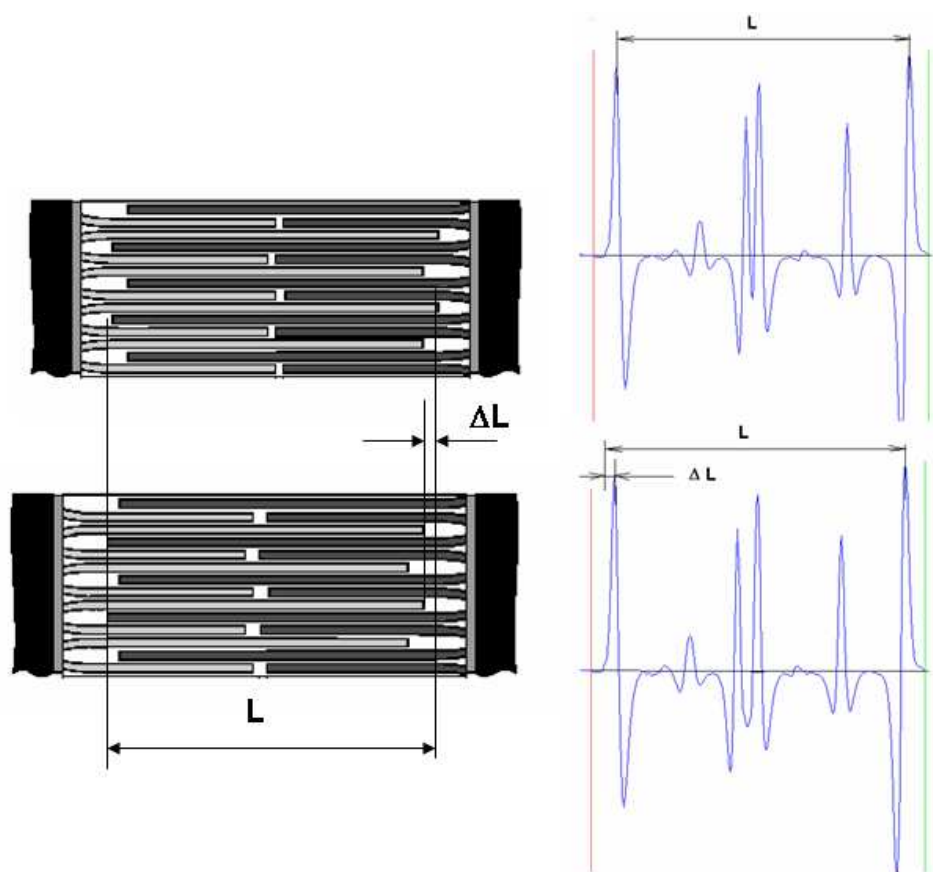
e) Rejestracja uszkodzeń pojawiających się równocześnie w całym przekroju

Uszkodzenia tego typu należą do najbardziej niebezpiecznych, ponieważ ich pojawienie się może prowadzić do przzerwania taśmy przenośnikowej. Dlatego też bardzo ważne jest odpowiednio wczesne wykrycie tych uszkodzeń. Opracowywany system musi mieć możliwość porównywania wcześniejszych wyników badań z obecnie wykonywanymi. Porównanie wyników badań można przeprowadzić poprzez analizę wcześniej stworzonych macierzy symptomowych i sumowanie uszkodzeń w danym przekroju taśmy. Nagły wzrost liczby uszkodzeń powinien być sygnalizowany alarmem i zatrzymaniem przenośnika. System powinien mieć również możliwość interpretacji stopnia zagrożenia. Wczesne wykrycie poważnych usterek może pomóc przy planowaniu prac naprawczo-konserwatorskich lub wymianie zużytego odcinka taśmy.

f) Sygnalizacja i analiza wydłużenia połączenia

Połączenia poszczególnych odcinków taśmy muszą być poddane analizie w trakcie wykonywania badań. Podczas eksploatacji może ulec zmianie długość połączenia, co pokazano na rysunku 6.9. Istnieją dwie możliwości rozpoznawania tych zmian. Pierwsza poprzez elektroniczny pomiar długości zarejestrowanego sygnału, druga poprzez

zastosowanie sztucznej inteligencji do rozpoznawania kształtu obrazu sygnału [18, 19]. Warunkiem zastosowania drugiej metody jest odpowiednie, zgodne z przyjętymi standardami, wykonywanie połączeń, co w warunkach przemysłowych nie jest łatwe (zachowanie prawidłowych długości końców linek stalowych w połączeniu).

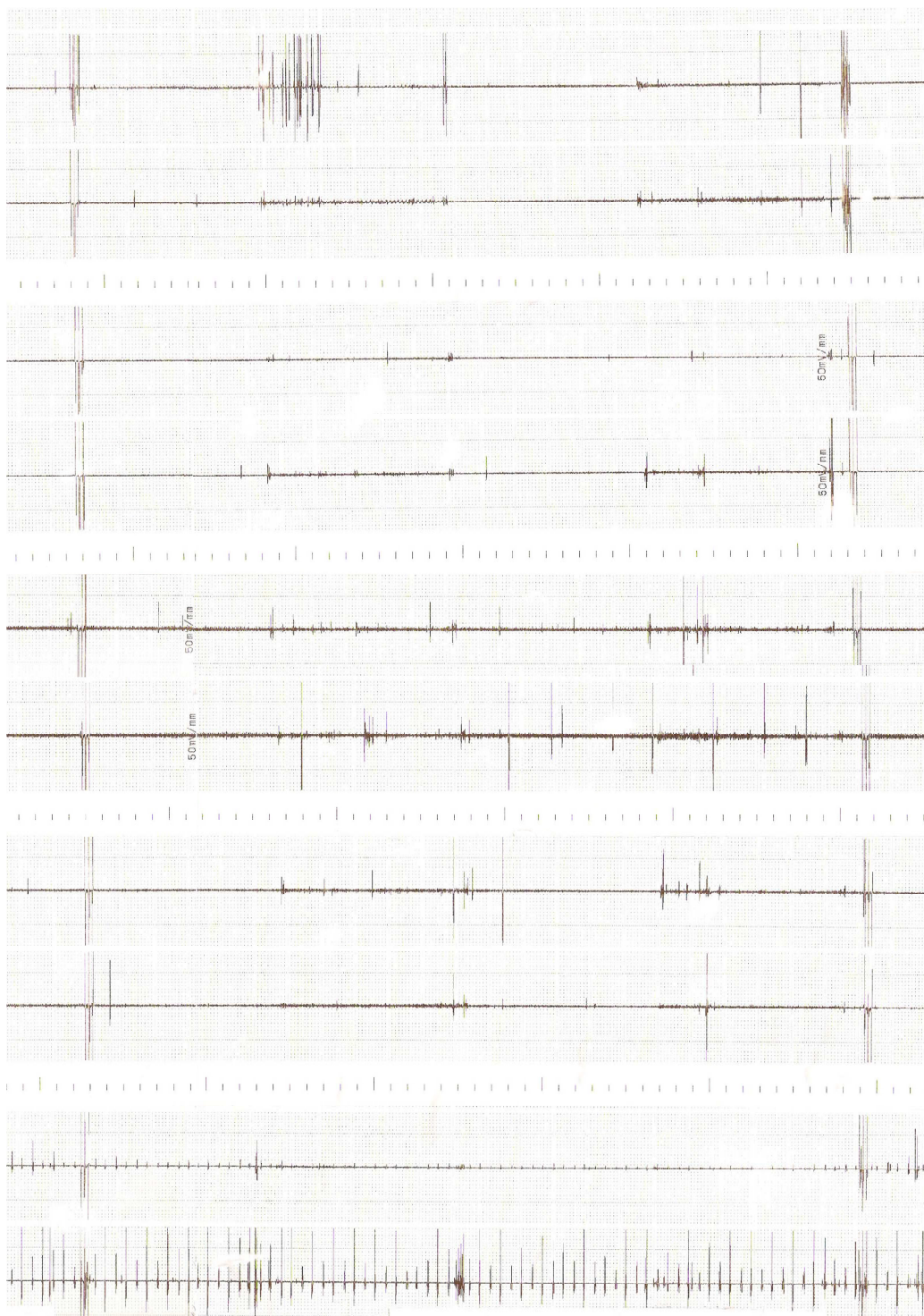


Rys. 6.9. Zmiana wydłużenia taśmy i zmiana długości sygnału generowanego przez połączenie dwustopniowe

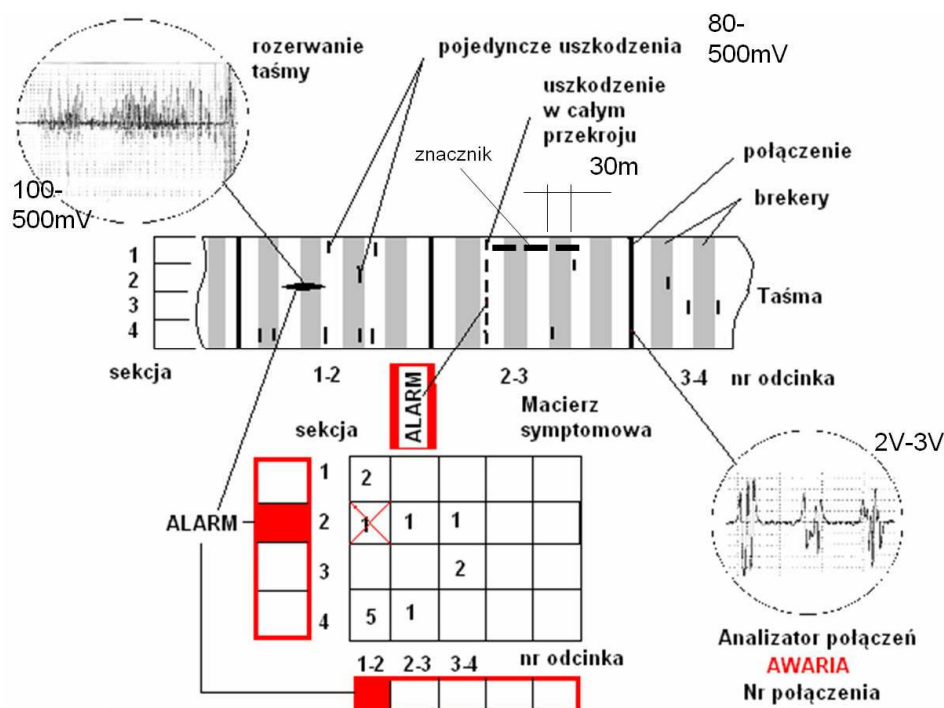
g) Dokument z badania (defektogram)

W standardowej defektoskopii wynikiem z badania taśmy jest defektogram (rys. 6.10). Jest to podstawowy dokument otrzymywany podczas badania, na podstawie którego można zidentyfikować wszystkie uszkodzenia, jakie zaistniały w danej taśmie transporterowej w czasie jej pracy [18, 19]. Przykładowy defektogram z wieloma uszkodzeniami pokazano na rysunku 6.10. Na rysunku 6.11 pokazano schematycznie rozkład charakterystycznych uszkodzeń w różnych konfiguracjach. Odpowiadają im odpowiednie wartości zliczanych uszkodzeń umieszczonych w symptomowej macierzy obserwacji. W macierzy tej sygnalizowane są także stany awaryjne związane ze zmianą długości połączenia,

pojawiającymi się jednocześnie uszkodzeniami w całym przekroju taśmy oraz przecięciami wzdłużnymi taśmy.



Rys. 6.10. Przykładowy fragment defektogramu uzyskanego z badania taśmy w kopalni Jankowice



Rys. 6.11. Uszkodzenia taśmy i odpowiadająca im macierz symptomowa [17]

System pomiarowy powinien mieć możliwość określenia trzech stanów awaryjnych:

- **Przecięcia wzdłużne** – wystąpienie tego stanu awaryjnego w badanej taśmie przENOŚnikowej związane jest z sytuacją wystąpienia przerwania taśmy wzdłuż jej długości. Taka sytuacja powoduje natychmiastowe zatrzymanie przENOŚnika z równoczesnym pojawieniem się informacji o numerze odcinka taśmy i numerze sekcji pomiarowej, w której wystąpiło to zdarzenie.
- **Zmiana długości połączenia** – stan awaryjny związany z wystąpieniem tego zdarzenia dotyczy sytuacji, w której ma miejsce zmiana długości połączenia. W tym przypadku na ekranie analizatora uszkodzeń podawana jest informacja o numerze połączenia w którym nastąpiło niepożądane zdarzenie. Objawem zmiany długości połączenia jest zmiana długości sygnału wygenerowanego przez połączenie. W przypadku pojawienia się uszkodzenia przENOŚnik zostaje zatrzymany.
- **Uszkodzenie linek w całym przekroju metalicznym** – stan awaryjny związany ze zmianą przekroju metalicznego występuje w sytuacji pojawienia się uszkodzenia

linek stalowych równocześnie w całym przekroju taśmy. W przypadku zaistnienia awarii przenośnik zostaje zatrzymany, a na ekranie analizatora uszkodzeń zostaje zasygnalizowany numer odcinka taśmy, w którym wystąpiło uszkodzenie.

h) Wpływ prędkości

System ciągłej analizy uszkodzeń nie może być podatny na zmianę prędkości przenośnika taśmowego. Ma możliwość badania taśmy z normalną prędkością roboczą do 7m/s. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu enkodera, który jest instalowany na krążniku przenośnika taśmowego i daje badaczowi informację o lokalizacji uszkodzenia wzdłuż długości taśmy. Używanie tego systemu diagnostycznego jest bardzo wygodne, ponieważ można go stosować przy pełnym załadunku podczas normalnej pracy.

i) Częstotliwość próbkowania

Częstotliwość próbkowania ma bardzo duży wpływ na dokładność badania. W systemie monitorowania minimalna częstotliwość jest ustalona na poziomie 1,5 kHz. Oczywiście zwiększenie tej wartości spowoduje większą dokładność podczas badania, ale także zwiększenie ilości informacji, która będzie analizowana.

Dla prędkości 4 m/s (na przykład w kopalniach podziemnych) przy częstotliwości 1,5 kHz otrzymujemy informację z badanej taśmy co około 2,5 mm. Jest to wystarczająca częstotliwość stosowana w defektoskopii magnetycznej lin stalowych.

Przy większych prędkościach ruchu taśmy należy zwiększyć częstotliwość próbkowania.

j) Wpływ drgań taśmy

Podczas normalnej pracy przenośnika taśma, przemieszczając się po zestawach krążnikowych, wpada w drgania poprzeczne. Drgania taśmy nie mogą mieć wpływu na dokładność wykonywanych pomiarów. Segmentowa głowica pomiarowa jest zainstalowana po obu stronach taśmy. Wynik pomiaru powstaje na podstawie sumowania cząstkowych sygnałów z górnej i dolnej głowicy (rys. 6.2).

7. Budowa analizatora stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi

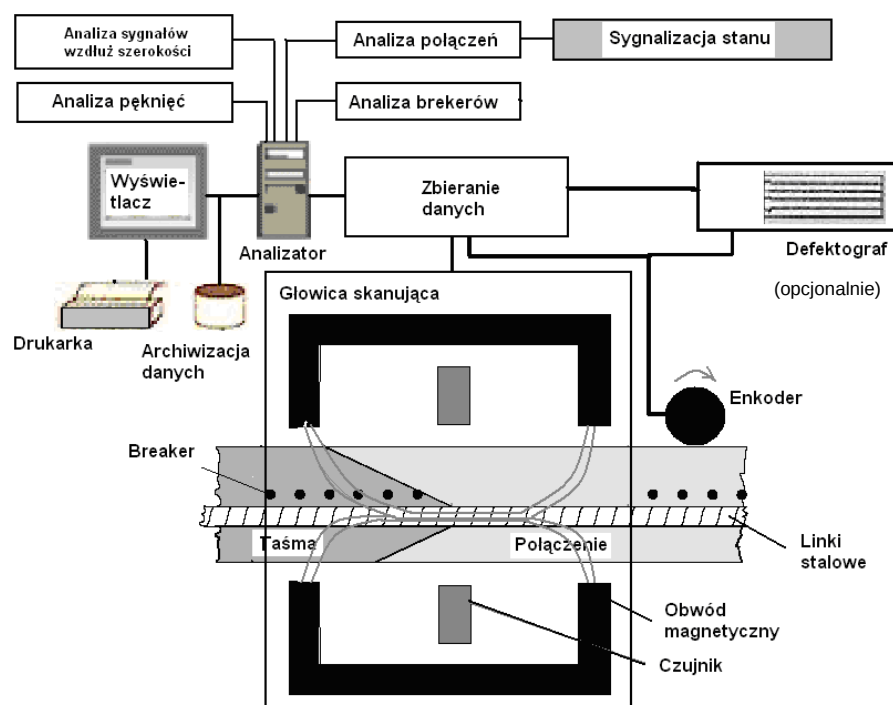
Ze względu na zbliżony kształt otrzymanego sygnału pochodzącego od różnych rodzajów uszkodzeń, konieczna jest gruntowna zmiana właściwości metrologicznych aparatury. Ma to zastosowanie zwłaszcza dla taśm przenośnikowych z breakerami, które wywołując zaburzenie pola magnetycznego w głowicy, utrudniają, a wręcz często uniemożliwiają prawidłową interpretację występujących w linkach stalowych zmian ich stanu technicznego.

System ciągłej analizy stanu technicznego taśm z linkami stalowymi składa się z sześciu podstawowych elementów:

- a) magnesy trwałe (segmentowa głowica pomiarowa) – są źródłem pola magnetycznego (pola rozproszenia),
- b) czujniki pomiarowe w układzie różnicowym – zbierają informacje o uszkodzeniach w linkach stalowych, o pęknięciach breakerów oraz o zmianach w połączeniach,
- c) czujnik przemieszczenia (enkoder) – pozycjonuje położenie taśmy (określa miejsca uszkodzeń i połączeń),
- d) interfejs – przetwarza informacje na postać cyfrową,
- e) macierz danych – rejestracja uzyskanych informacji,
- f) program do wizualizacji wyników – przetwarza informacje – analizator uszkodzeń.

Podstawowym wyróżnikiem nowego systemu w stosunku do dotychczasowo stosowanych systemów diagnostycznych taśm przenośnikowych stała się wielosegmentowa głowica pomiarowa. Zastosowanie jej miało na celu wielokrotne skrócenie czasu potrzebnego na wykonanie badania, jak również łatwiejsze zlokalizowanie uszkodzeń na taśmie z linkami stalowymi, zarówno na długości taśmy, jak również na szerokości.

System monitoringu taśm z linkami stalowymi posiada również możliwość filtracji sygnału z zakłóceń wynikających z zastosowania breakerów w taśmie transporterowej oraz analizy wyników. Oprócz tego system ciągłej rejestracji uszkodzeń posiada możliwość analizy wyników pod względem rodzaju uszkodzeń i ich ilości. Poniżej przedstawiono schemat budowy nowego systemu diagnostycznego (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Schemat budowy systemu diagnostycznego

7.1. Opis części mechanicznej (głowica segmentowa)

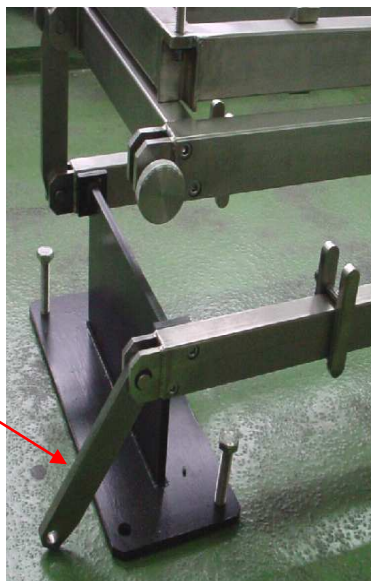
Elementem niezbędnym do zamocowania segmentów głowicy pomiarowej jest rama nośna (rys. 7.2). Rama ta została wykonana z materiału niemagnetycznego – stali nierdzewnej.

Konstrukcja ramy posiada uchylne elementy (rys. 7.3) pozwalające na wsunięcie jej na badaną taśmę. Na górnym i dolnym elemencie ramy nośnej usytuowane są regulowane ograniczniki utrzymujące poszczególne segmenty w odpowiednim miejscu nad badaną taśmą (rys. 7.4).



Rys. 7.2. Widok ramy z układem regulacji odległości połówek głowicy

Uchylny
element



Rys. 7.3. Widok podwójnej ramy z uchylnymi elementami konstrukcyjnymi

ogranicznik



Rys. 7.4. Widok ogranicznika ruchu głowicy segmentowej

Kolejnym elementem wchodzącym w skład systemu pomiarowego są segmenty głowicy. Widok segmentów umieszczonych na ramie nośnej przedstawia rysunek 7.5.



Rys. 7.5. Widok segmentów głowicy na ramie nośnej

Metoda defektoskopii magnetycznej lin stalowych jest metodą znaną od dziesięcioleci i dosyć szeroko rozpowszechnioną wśród diagnostyków, zwłaszcza tam, gdzie nie można zbadać obiektu w sposób wizualny. Taka właśnie sytuacja ma miejsce w przypadku linek stalowych zawulkanizowanych w taśmie przenośnikowej, czy też lin stalowo-gumowych.

Głowica pomiarowa jest podstawowym elementem zestawu diagnostycznego. Jej właściwości metrologiczne decydują o przydatności metody pola stałego do badania elementów ferromagnetycznych.

Obwód magnetyczny głowicy pomiarowej definiuje się jako zamkniętą drogę strumienia indukcji magnetycznej, będącą częścią pola magnetycznego o większej gęstości energii na jednostkę objętości w porównaniu z częściami otaczającymi [14].

Głowica pomiarowa stanowi zwartą konstrukcję składającą się z:

- obwodu magnetycznego, w skład którego wchodzi nabiegunniki, zwora magnetyczna, kształtki magnetyczne, zwane popularnie magnesami trwałymi,
- czujnika pomiarowego umieszczonego w płaszczyźnie symetrii głowicy,
- elementów prowadzących, służących do osiowego ustawienia głowicy na badanej taśmie,
- przetwornika drogi (enkoder).

Konstrukcyjne parametry określające głowicę pomiarową i jednocześnie wpływające na jej właściwości metrologiczne można podzielić na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią parametry charakteryzujące obwód magnetyczny. W grupie tej wyróżniamy poniżej przedstawione parametry.

- Wpływające na położenie punktu pracy materiału przeznaczonego na magnesy trwałe.

Są nimi: przekrój s_m i długość l_m kształtki magnetycznej oraz rodzaj materiału magnetycznego. Istotną rolę przy projektowaniu obwodu magnetycznego głowicy odgrywa również kształt zastosowanego magnesu trwałego.

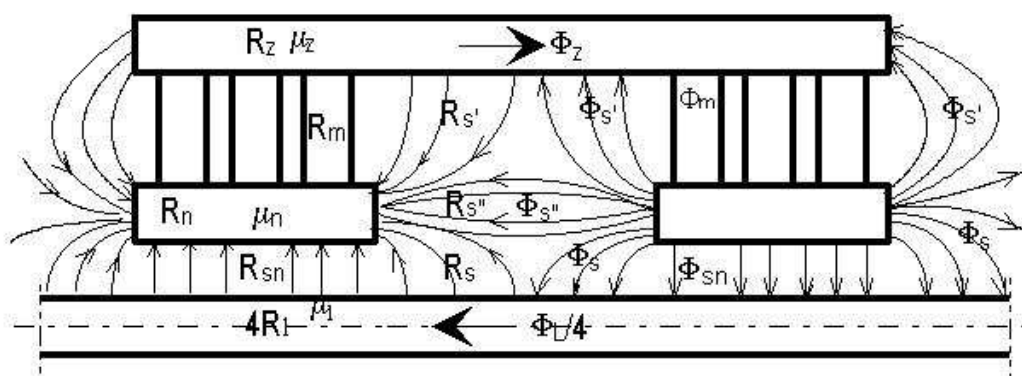
- Określające kształt obwodu magnetycznego. Są to wymiary nabiegunników i zwory magnetycznej (odległość między nabiegunnikami l_{mn} wpływa na długość zwory magnetycznej).

Drugą stanowią parametry opisujące czujnik pomiarowy: szerokość i wzajemna ich odległość.

Wymienione wyżej parametry w sposób zasadniczy wpływają na efektywność zastosowanej analizy sygnałów niestacjonarnych. Stąd wyłoniła się potrzeba dokonania pełnej analizy wszystkich elementów obwodu magnetycznego. W efekcie prowadzenia tej analizy powstały również czujniki przemieszczeń, które znalazły zastosowanie w różnych dziedzinach techniki nie związanych z defektoskopią magnetyczną elementów ferromagnetycznych.

Obwód magnetyczny, stanowiący integralną część głowicy, zamyka się przez materiały magnetyczne (zwora, nabiegunnik, lina) i środowisko niemagnetyczne jakim jest powietrze. Zaliczyć go można do grupy obwodów otwartych [2, 3, 5], dla których część wytworzonego przez magnes strumienia przebiega w środowisku niemagnetycznym. Te występujące w głowicy duże szczeliny powietrzne powiększają strumień rozproszenia, wpływając na bieg strumienia magnetycznego i utrudniają prawidłowe obliczanie obwodu magnetycznego. Materiały magnetyczne, będące częścią obwodu magnetycznego głowicy, mogą występować w niej w różnych konfiguracjach.

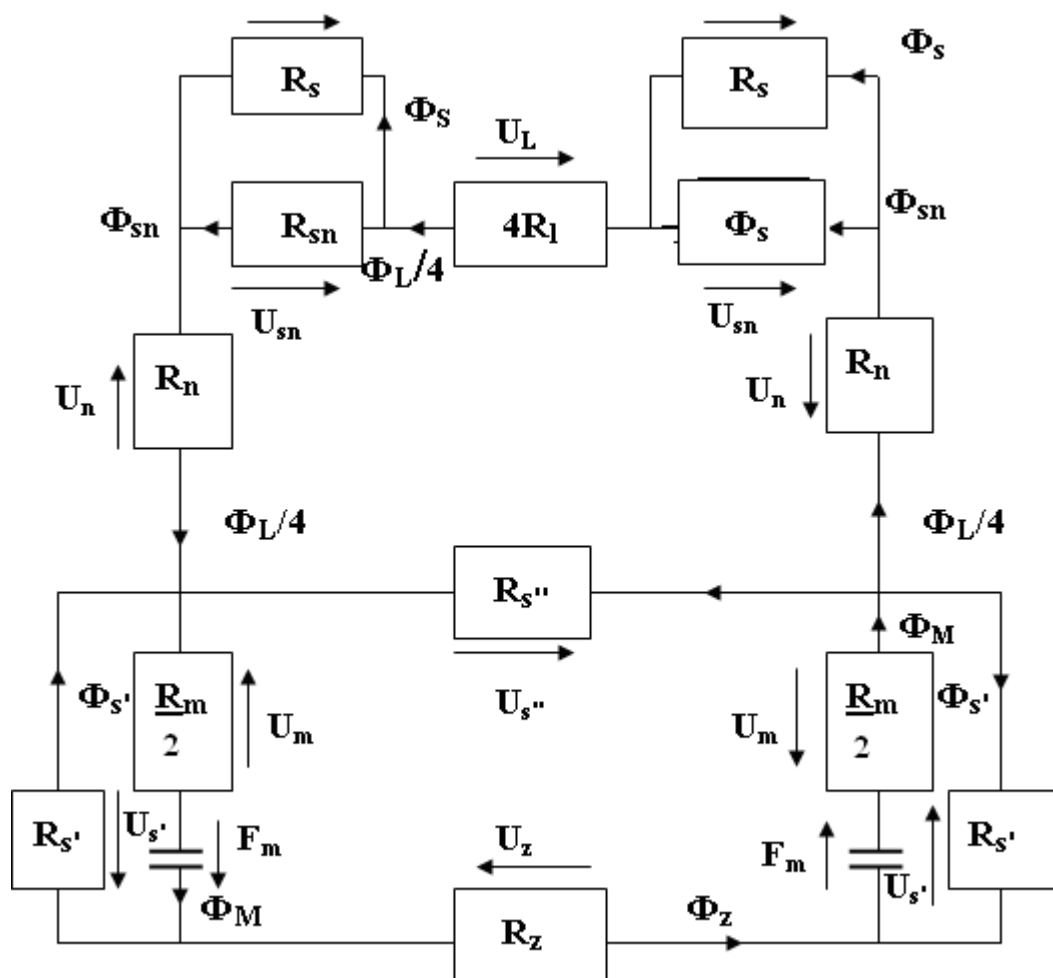
W analizowanym przykładzie badana lina magnesowana jest przez dwa symetrycznie ułożone obwody magnetyczne (rys. 7.6. przedstawia jedną część obwodu).



Rys. 7.6. Analizowany obwód magnetyczny [14]

Strumień $\Phi_M = 2 \cdot \Phi_m$ wytworzony przez trzy kształtki magnetyczne rozkłada się na strumień użyteczny $\Phi_L/4$, w skład którego wchodzi strumień Φ_{sn} i Φ_s oraz strumień nieużyteczny stanowiący sumę strumienia strat powierzchniowych $\Phi_{s'}$ i strat biegunowych $\Phi_{s''}$. Za jednorodne można przyjąć strumienie Φ_m , Φ_{sn} , Φ_L , Φ_z , natomiast Φ_s , $\Phi_{s'}$, $\Phi_{s''}$ są strumieniami niejednorodnymi. Strumień strat powierzchniowych $\Phi_{s'}$ może stanowić w najniekorzystniejszych warunkach do 60% strumienia w linii Φ_L , natomiast strumień strat biegunowych $\Phi_{s''}$ do 30% strumienia Φ_L . Fakt powyższy tłumaczy istotę zagadnienia, jaką jest wyznaczenie takich parametrów obwodu, które by pośrednio minimalizowały straty strumienia rozproszenia z równoczesnym wzrostem strumienia użytecznego. Wytworzenie tego strumienia o jak największej wartości daje możliwość zapewnienia całkowitej wykrywalności uszkodzeń w badanym obiekcie, szczególnie przy zastosowaniu metod analizy sygnałów przedstawionych w kolejnych rozdziałach pracy [2, 14, 16, 17].

Korzystając z analogii elektromagnetycznych, zbudowano zastępczy schemat elektryczny odpowiadający rzeczywistemu obwodowi magnetycznemu głowicy pomiarowej przedstawiony na rysunku 7.7.

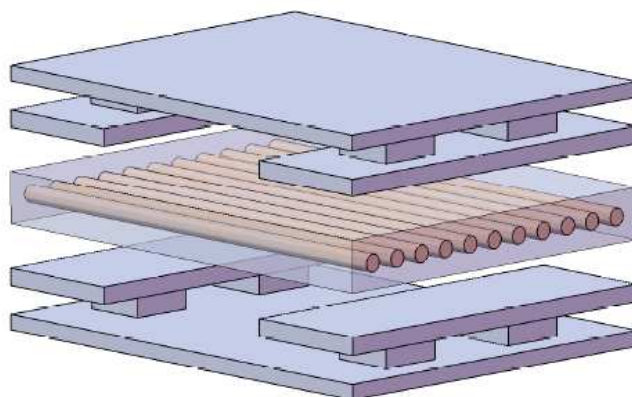


Rys. 7.7. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego [14]

Znajomość modelu matematycznego obwodu magnetycznego [14] upraszcza jego projektowanie, konstruowanie i wykonanie. Na podstawie modelu matematycznego przedstawionego w pracy [14] opracowano prototyp obwodu magnetycznego głowicy pomiarowej, która znalazła zastosowanie w systemie monitorowania taśm przenośnikowych z linkami stalowymi [16, 17].

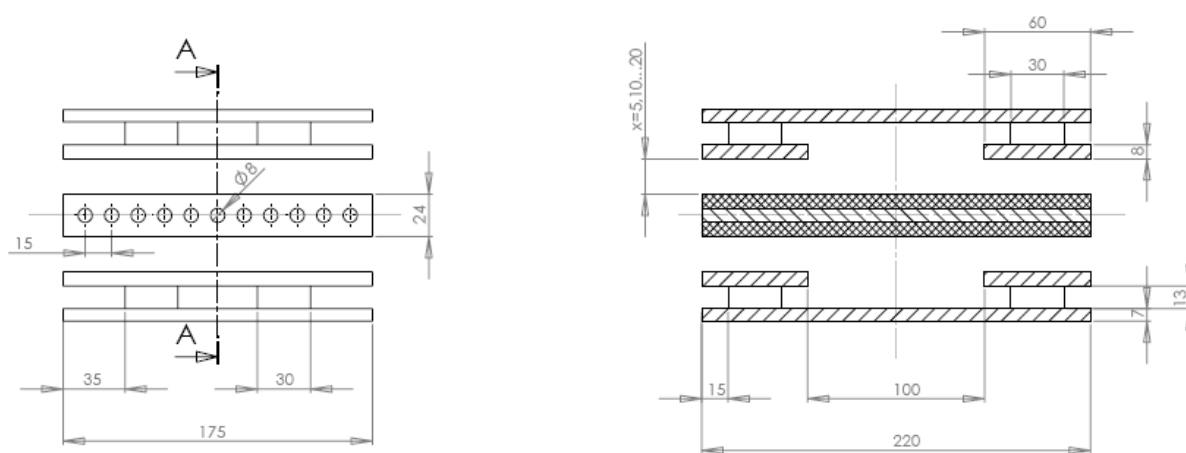
Do weryfikacji właściwości metrologicznych obwodu magnetycznego wykorzystano metodę elementów skończonych.

Przedmiotem analiz numerycznych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych w programie ANSYS była konstrukcja głowicy do badania linek stalowych taśm przenośnikowych. Wykonany model trójwymiarowy analizowanej głowicy (rys. 7.8) w oprogramowaniu CAD – Solid Works, zaimplementowano do programu typu CAE – ANSYS.

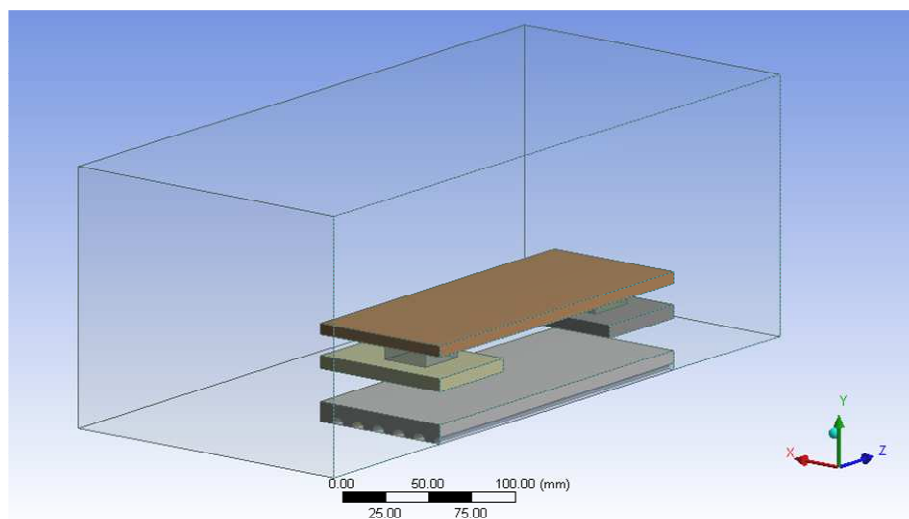


Rys. 7.8. Model 3D analizowanej konstrukcji głowicy

Ze względu na symetrię kształtu głowicy pomiarowej, jak i wymuszenia (rys. 7.9) (pole magnetyczne, którego źródłem są magnesy trwałe), w dwu wzajemnie prostopadłych płaszczyznach zdecydowano się na uproszczenie analizowanej geometrii 3D do $\frac{1}{4}$ modelu (rys. 7.10). Kolejnym założeniem, którego celem było uproszczenie opisu stanu rzeczywistego oraz obliczeń numerycznych, było zastąpienie modeli 3D linek rzeczywistych, modelami w postaci prętów.

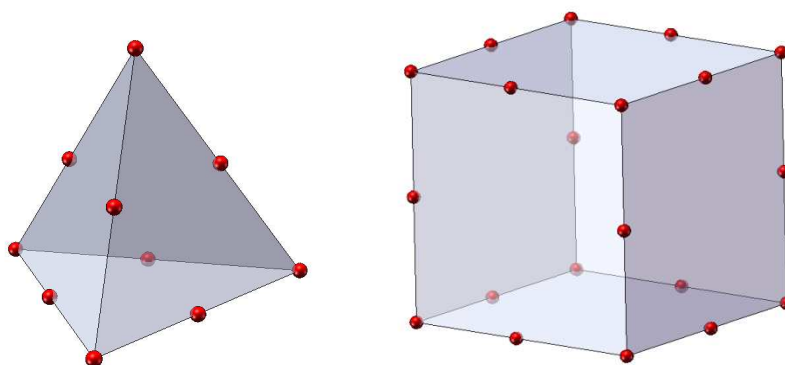


Rys. 7.9. Fragment dokumentacji technicznej głowicy obrazujący symetrię kształtu, jak i wymuszenia (magnesów) względem dwu wzajemnie prostopadłych płaszczyzn

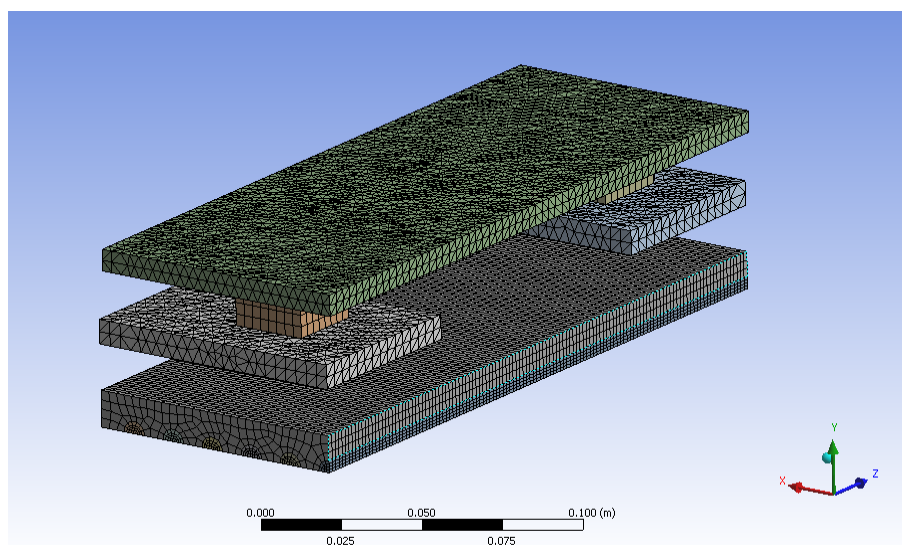


Rys. 7.10. Uproszczenie - $\frac{1}{4}$ geometrii modelu wraz z otoczeniem powietrznym

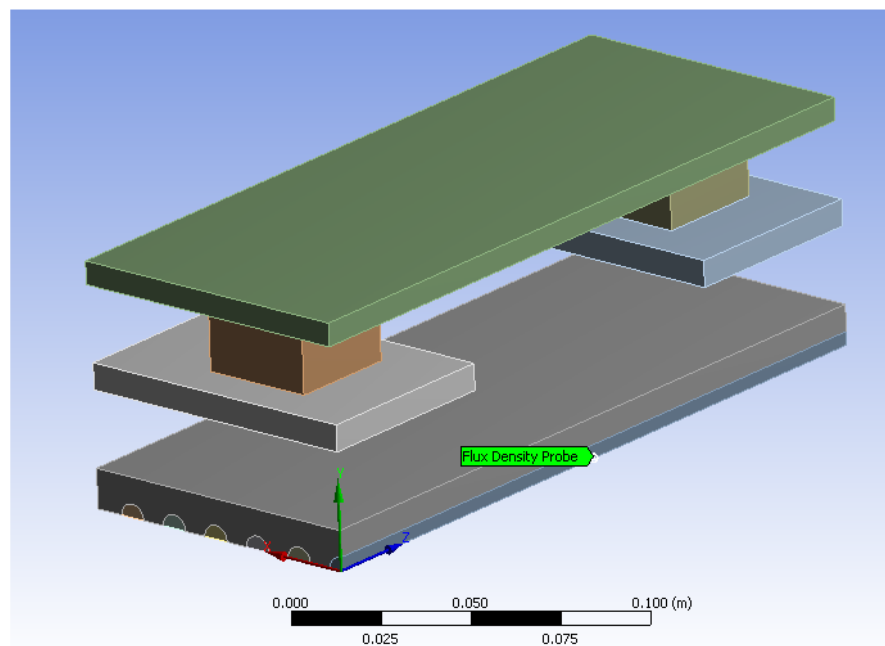
Analizowana przestrzeń (model 3D wraz z otoczeniem powietrznym – rys. 7.10) została zdyskretyzowana z użyciem elementów przestrzennych typu tetra i hexa (rys. 7.11, 7.12).



Rys. 7.11. Elementy skończone typu tetra (po lewej) i hexa (po prawej) stronie



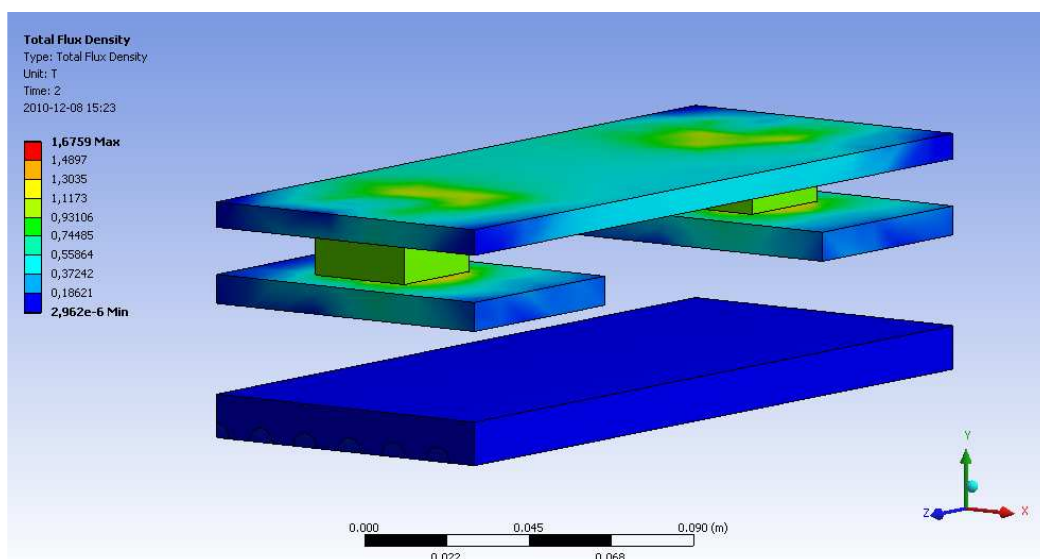
Rys. 7.12. Dyskretyzacja - $\frac{1}{4}$ geometrii modelu wraz z siatką elementów skończonych



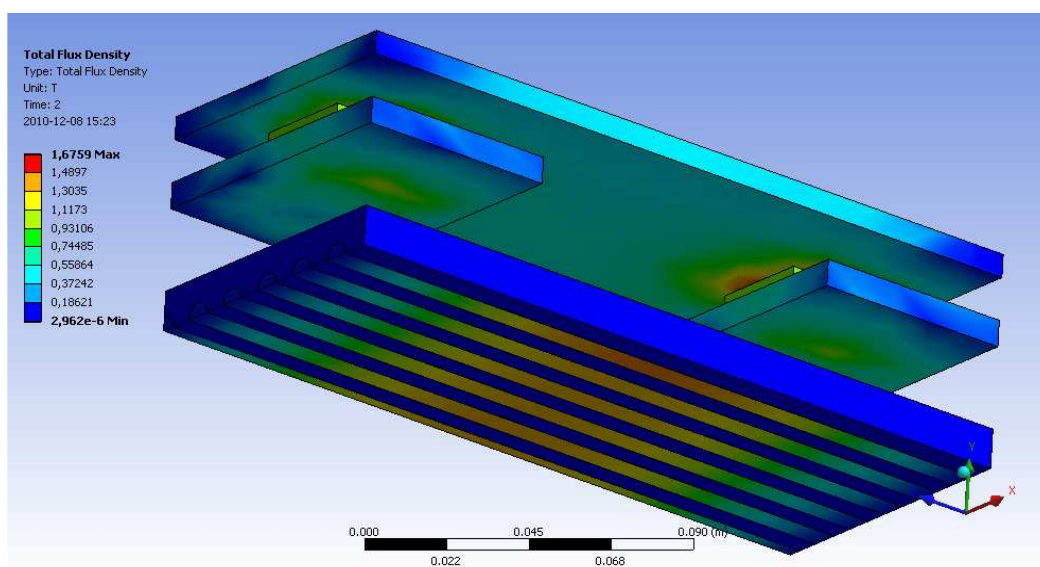
Rys. 7.13. Lokalizacja próbki (miejsca pomiarowego) w połowie długości centralnej linki taśmy

Jednym z ważniejszych parametrów metrologicznych związanych z wysoką wykrywalnością wad w lince jest odpowiednio wysoka wartość indukcji w badanej strukturze na poziomie ok. 1,3 T. Parametr ten został przyjęty jako funkcja celu pewnego rodzaju wielokryterialnej optymalizacji przeprowadzonej z wykorzystaniem symulacji numerycznych. Jako zmienne decyzyjne tej optymalizacji przyjęto 3 parametry. Dwa z nich związane są z energią magnetyczną dostarczoną do obwodu, czyli z wymiarami magnesów trwałych, do których możemy zaliczyć – 1) wysokość magnesu, 2) szerokość magnesu o przekroju kwadratu. Trzeci parametr związany jest ze specyfiką pomiaru rzeczywistego, w trakcie którego zmiana ulega – 3) wartość szczeliny powietrznej pomiędzy głowicą a taśmą przenośnikową. Przeanalizowano ww. parametry w zakresie: szerokość magnesu (od 20 do 35 mm), wysokość magnesu (od 10 do 25 mm), szczelina powietrzna (od 5 do 25 mm). Pomiar parametru funkcji celu (maksimum indukcji) został zlokalizowany dokładnie w centrum przestrzeni objętej głowicą (połowa środkowej linki) (rys. 7.13). Analizy numeryczne i optymalizacja posłużyły również do określenia innych wielkości geometrycznych w konstrukcji głowicy, tj. np: nabiegunki, dzięki czemu zapewniono możliwie równomierny rozkład pola magnetycznego (indukcji magnetycznej) w badanych linkach objętych obszarem głowicy (rys. 7.15). Przykładowe obrazy rozkładu pola magnetycznego (indukcji magnetycznej) prezentują rysunki (rys. 7.14 – 7.16), wykonane dla wariantu najmniej korzystnego tzn. dla szczeliny powietrznej o wielkości 25 mm oraz

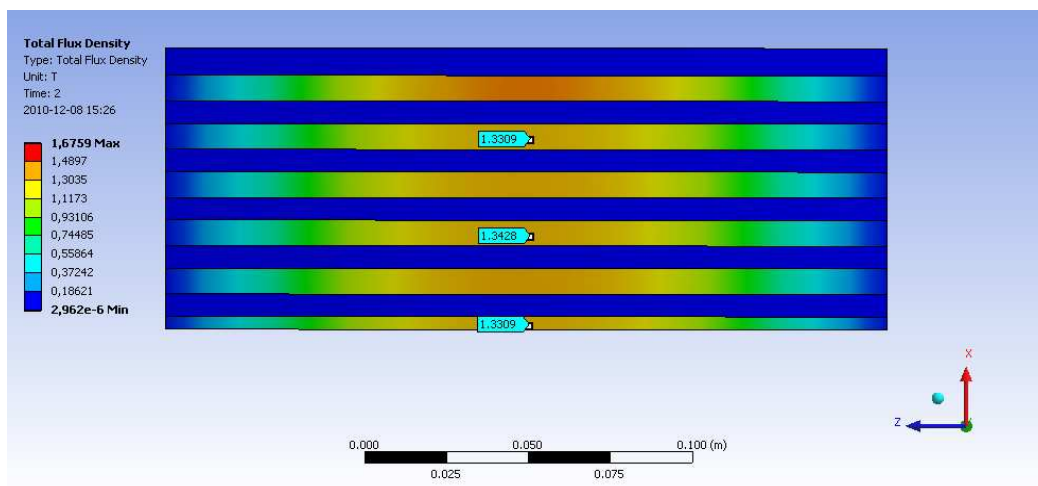
magnesów neodymowych NdFeB o wymiarach 30x30x13 mm zastosowanych w rzeczywistej głowicy prototypowej.



Rys. 7.14. Wyniki obliczeń MES (indukcja magnetyczna) dla magnesu o wymiarach 30x30x13 mm i szczeliny powietrznej 25 mm

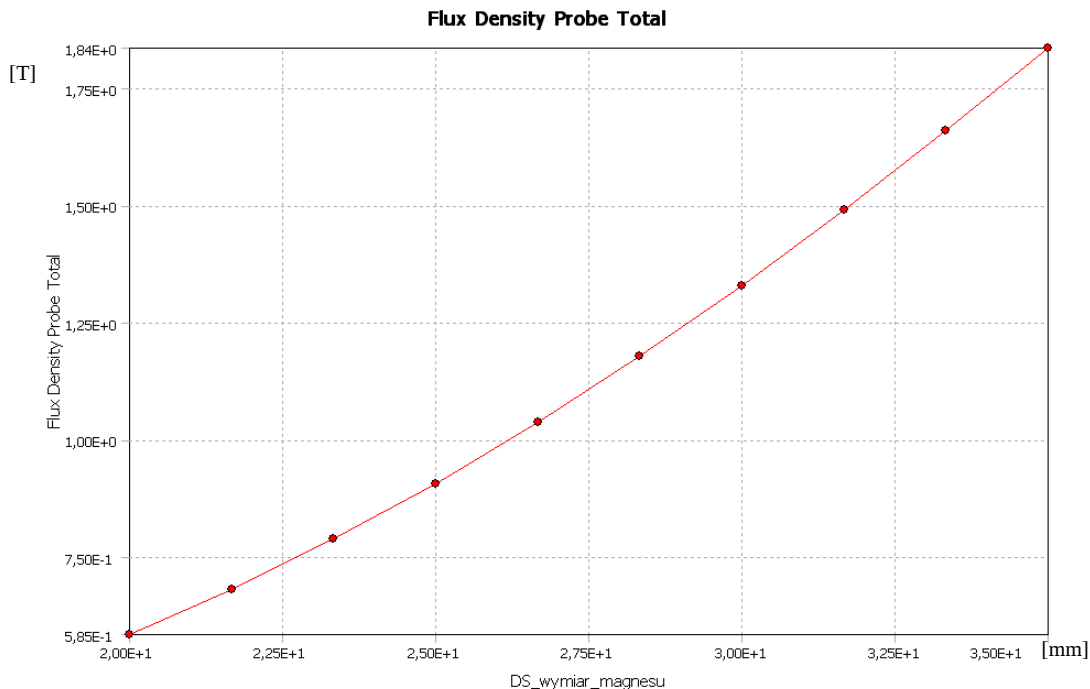


Rys. 7.15. Wyniki obliczeń MES (indukcja magnetyczna) dla magnesu o wymiarach 30x30x13 mm i szczeliny powietrznej 25 mm



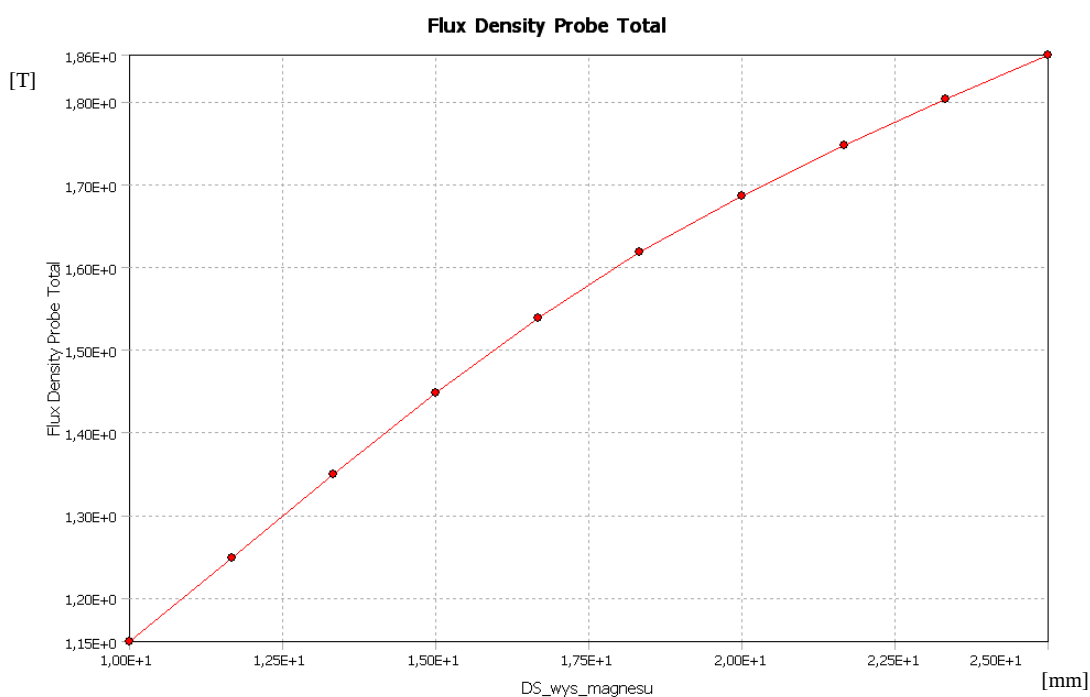
Rys. 7.16. Wyniki obliczeń MES (indukcja magnetyczna) dla magnesu o wymiarach 30x30x13 mm i szczeliny powietrznej 25 mm – równomierny rozkład indukcji w każdej z linek

Analiza zmienności parametru, jakim była szerokość magnesu przy jednoczesnym założeniu jego wysokości równiej 13 mm i szczeliny powietrznej równej 25 mm wykazała, że wymiar magnesu o przekroju kwadratowym równym 30x30 mm będzie wystarczający by zapewnić odpowiednią ilość energii magnetycznej w obwodzie oraz poziom indukcji w linii ok. 1,35 T (rys. 7.17).



Rys. 7.17. Indukcja w linii B[T] w funkcji wymiaru (szerokości) magnesu w granicach ok. 20-35 mm o przekroju poprzecznym kwadratu dla szczeliny powietrznej o wielkości 25 mm

Analiza zmienności parametru, jakim była wysokość magnesu przy jednoczesnym założeniu, że jego wymiary wynoszą 30x30 mm i szczelinie powietrznej równej 25 mm wykazała, że wysokość magnesu równa ok. 13 mm będzie wystarczająca by zapewnić odpowiednią ilość energii magnetycznej w obwodzie oraz poziom indukcji w linii ok. 1,35 T, a tym samym wysoką wykrywalność wad (rys. 7.18).

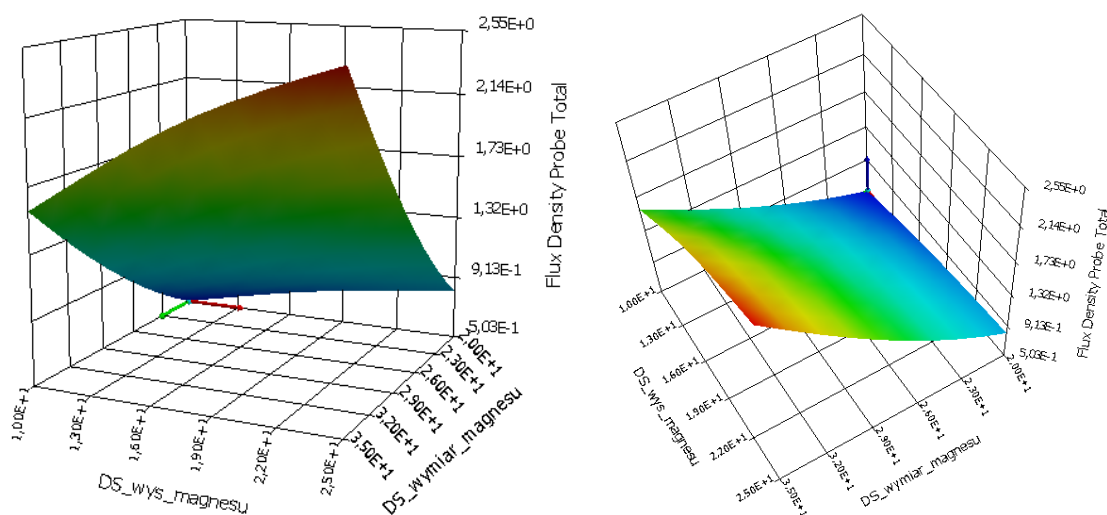


Rys. 7.18. Indukcja w linii B[T] w funkcji wysokości magnesu w granicach ok. 10-25 mm o przekroju poprzecznym kwadratu 30x30 mm dla szczeliny powietrznej o wielkości 25 mm

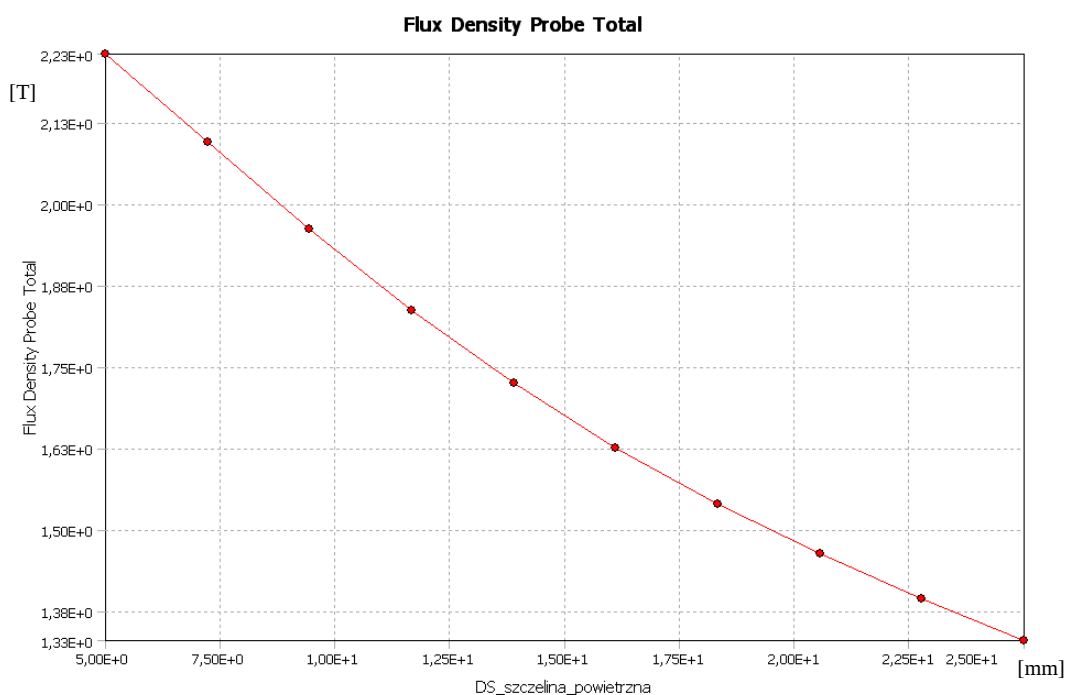
W wyniku przeprowadzonych symulacji numerycznych, przeanalizowano również wpływ parametrów tj. wysokości i szerokości magnesu na funkcje celu, czyli na wartość indukcji w linii (rys. 7.19). Wykres 3D przedstawia zależność indukcji w linii w funkcji dwóch ww. parametrów (zmiennych decyzyjnych optymalizacji). Bazując na wyżej opisanych analizach, wykresie 3D (rys. 7.19) oraz ograniczeniach związanych z minimalną wartością indukcji w linii, jaką należy zapewnić dla dobrej wykrywalności wad, ograniczeniach gabarytowych oraz założeniu, że szczelina powietrzna między taśmą a głowicą może wynosić do 25 mm, dobrano 4 magnesy typu NdFeB o wymiarach 30x30x13 mm.

Wykres przedstawiony na rysunku 7.20 obrazuje wpływ wielkości szczeliny powietrznej na wartość indukcji w linii. Widać wyraźnie, że przy założonych wymiarach magnesów i szczeliny sięgającej ok. 25 mm wartość indukcji w linii jest bliska 1,35 T.

Zbudowany egzemplarz prototypowy głowicy w oparciu o powyższe ustalenia oraz testy na obiektach rzeczywistych potwierdziły słuszność przyjętych założeń i parametrów konstrukcyjnych tego urządzenia diagnostycznego.

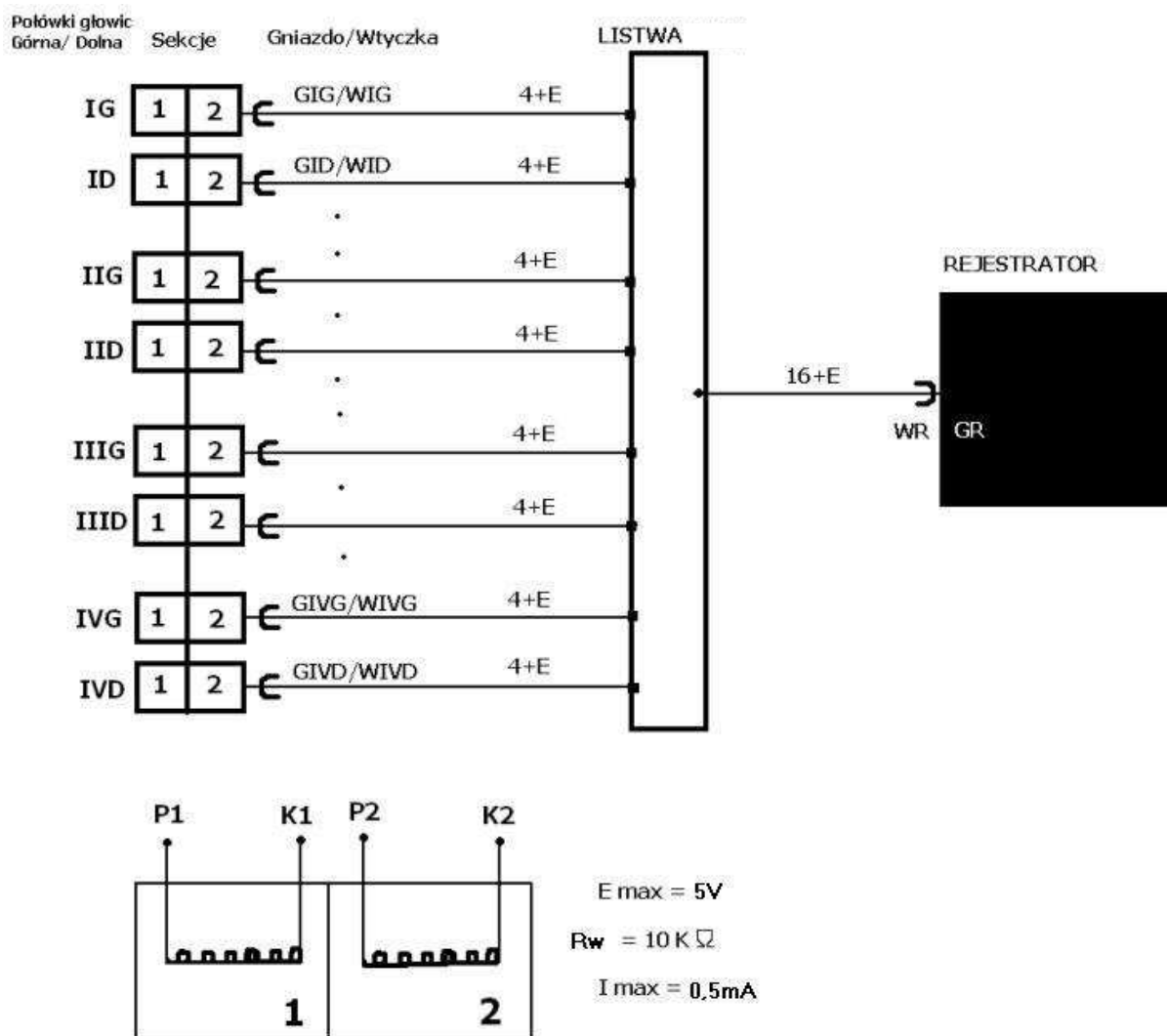


Rys. 7.19. Indukcja w linii w funkcji dwóch parametrów (wysokość magnesu 10-25 mm i szerokość magnesu 20-35mm o przekroju poprzecznym kwadratu)



Rys. 7.20. Indukcja w linii B[T] w funkcji wielkości szczeliny powietrznej zmieniającej się podczas pomiaru w granicach ok. 5-25 mm (szczelina powietrzna pomiędzy taśmą, a głowicą) – wariant dla zastosowanego magnesu 30x30x13 mm

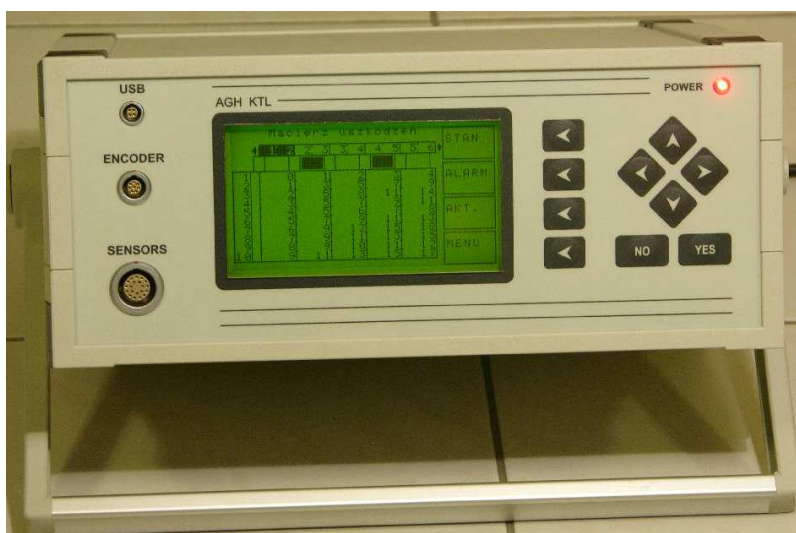
Wewnątrz każdego obwodu magnetycznego znajdują się indukcyjne czujniki pomiarowe. Rysunek 7.21 przedstawia blokowy schemat połączenia czujników segmentów głowicy pomiarowej z analizatorem uszkodzeń. Każdy segment głowicy wyposażony jest w dwa czujniki indukcyjne.



Rys. 7.21. Schemat połączeń czujników segmentów głowicy.

7.2. Opis części elektronicznej (analizator uszkodzeń)

Opisane w rozdziale szóstym założenia do opracowywanego systemu pomiarowego taśm z linkami stalowymi pozwoliły na wykonanie na zlecenie Katedry Transportu Linowego analizatora uszkodzeń niezbędnego do diagnostyki taśm z zawulkanizowanymi linkami. Widok analizatora uszkodzeń został przedstawiony na rysunku 7.22.

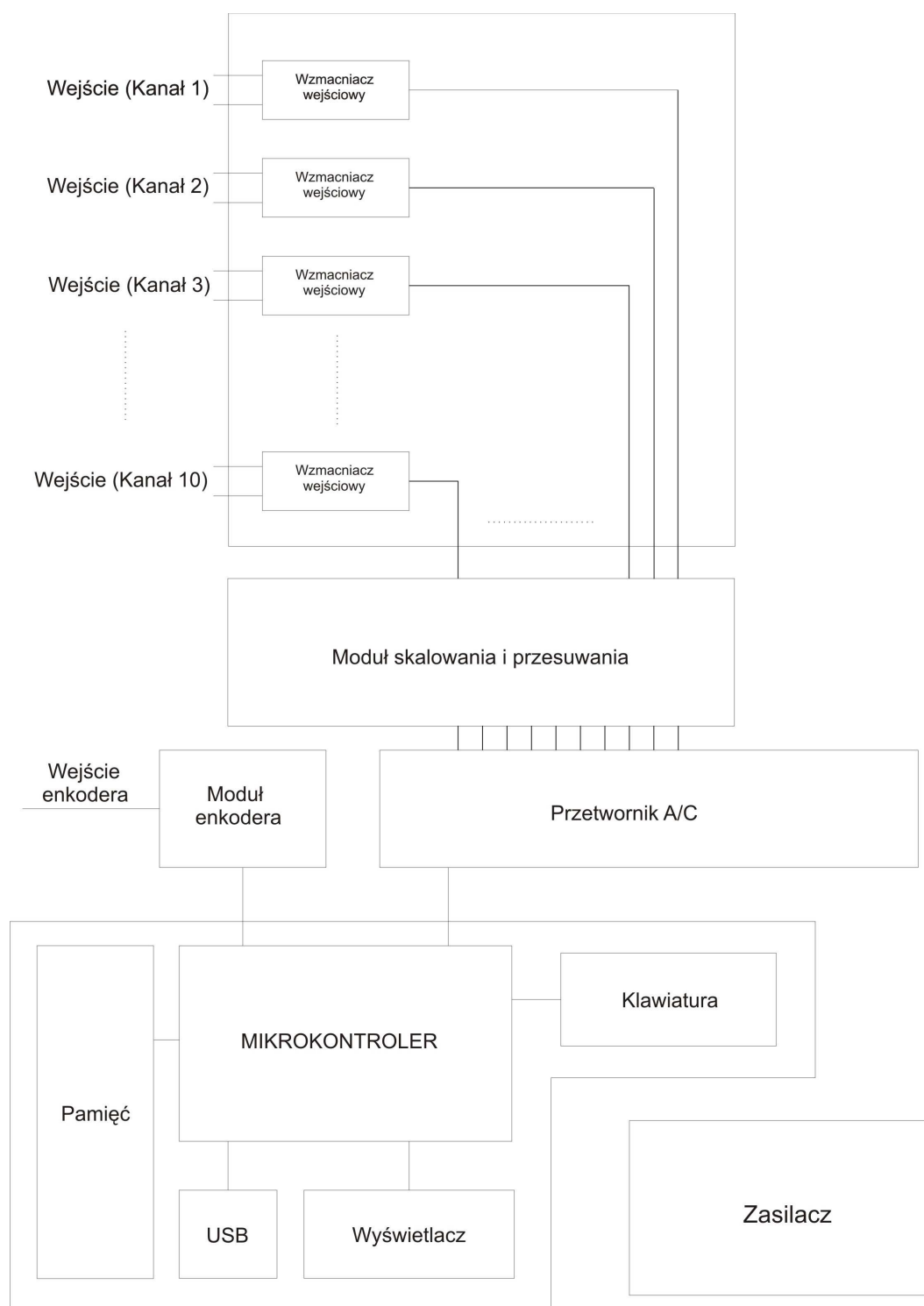


Rys. 7.22. Widok analizatora uszkodzeń

W skład analizatora uszkodzeń wchodzi:

- moduł skalowania i przesuwania - do którego przesyłane są poszczególne sygnały z głowicy segmentowej,
- przetwornik A/C,
- moduł enkodera.

Sygnały z mikrokontrolera są wizualizowane na wyświetlaczu i mogą być przesyłane do wewnętrznej pamięci urządzenia. Dodatkowo za pomocą wyjścia USB można sprzążyć analizator z komputerem PC. Schemat blokowy analizatora uszkodzeń przedstawiono na rysunku 7.23.

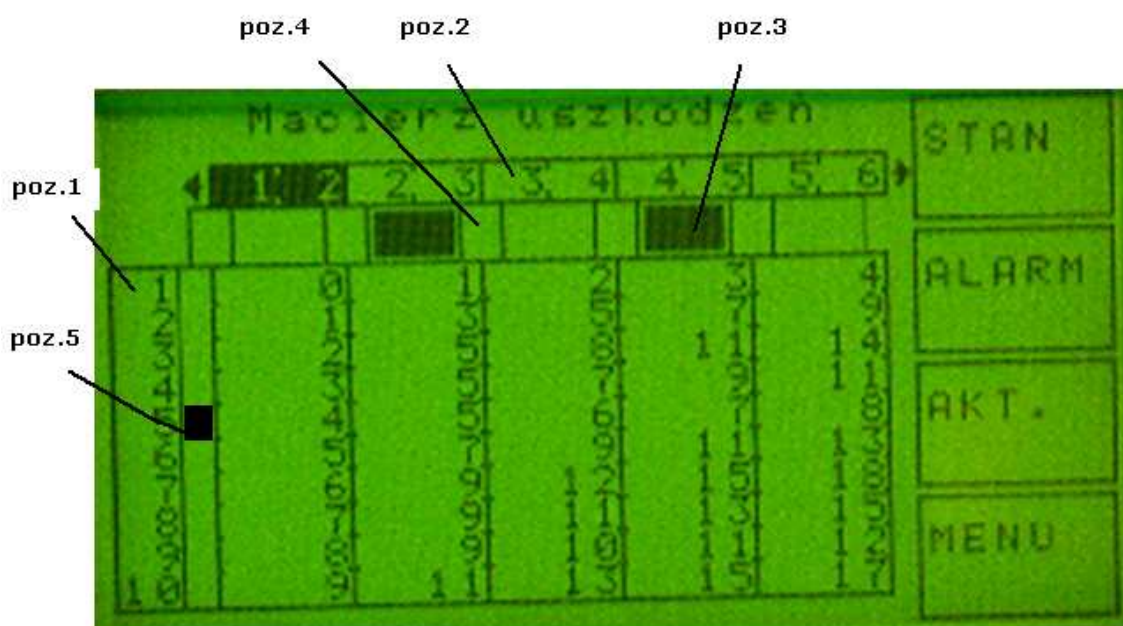


Rys. 7.23. Schemat blokowy analizatora uszkodzeń

W analizatorze uszkodzeń wzmacniacze wejściowe przekształcają sygnał różnicowy pochodzący z czujników w głowicy na sygnał napięciowy bipolarny $\pm 2,5V$. Moduł skalowania i przesuwania przekształca sygnał wychodzący ze wzmacniaczy wejściowych na sygnał unipolarny $0 \div 2,5V$, który bezpośrednio pasuje do wejść przetwornika A/C.

Zastosowany przetwornik A/C próbkuje sygnał z częstotliwością 20 kHz co zapewnia częstotliwość próbkowania równą 2 kHz w każdym kanale. Z analizatorem może współpracować zewnętrzny enkoder obrotowy służący do pomiaru drogi. Wbudowany moduł zapewnia zasilanie tego czujnika i odpowiednie buforowanie jego sygnałów wyjściowych. Całością pracy analizatora steruje mikrokontroler. Do komunikacji z użytkownikiem zastosowano klawiaturę oraz wyświetlacz LCD. Komunikację z komputerem zewnętrznym zapewnia wbudowany port USB. Urządzenie posiada wewnętrzną pamięć typu FRAM, która umożliwia zapamiętywanie stosownych wyników analizy. Wewnątrz analizatora znajduje się również złącze do karty FLASH typu SD, której zastosowanie w przyszłości może służyć przykładowo do rejestracji sygnałów z głowicy.

Głównym i najważniejszym elementem, pojawiającym się na ciekłokrystalicznym wyświetlaczu analizatora, jest symptomowa macierz uszkodzeń (rys. 7.24). Analizując zarejestrowaną podczas badania macierz, można ocenić stan techniczny badanej taśmy pod względem liczby uszkodzeń w poszczególnych jej odcinkach. Analiza ta jest niezbędna do prawidłowego funkcjonowania przenośnika, sprawnej odstawy urobku z miejsca wydobycia do zbiorników magazynowych czy wreszcie do wydłużenia żywotności taśmy.



Rys. 7.24. Widok macierzy uszkodzeń

Po lewej stronie macierzy (poz.1) podana jest numeracja kolejnych sekcji pomiarowych usytuowanych na stałe nad badaną taśmą. Pozwala to na określenie, w którym miejscu w poprzek taśmy znajduje się uszkodzenie. Poszczególne kolumny macierzy związane są z kolejnymi odcinkami łączonej taśmy, co jest oznaczone cyframi: 1-2, 2-3, 3-4 itd. (poz. 2).

Z uwagi na dużą liczbę możliwych odcinków łączonej taśmy i zwiększenie czytelności macierzy, pasek informujący o zanumerowanym odcinku taśmy jest przewijany. Zgodnie z wcześniej przyjętym założeniem, operator będzie mógł obserwować macierz na ekranie monitora komputera oraz śledzić przyrost liczby uszkodzeń we wszystkich odcinkach badanej taśmy.

Dla każdej sekcji pomiarowej jest możliwe ustalenie poziomu rejestracji sygnałów. W pasku macierzy (poz. 3) pojawia się informacja w postaci zaciemnionego pola informująca o pojawieniu się sygnałów we wszystkich sekcjach pomiarowych jednocześnie. Zgodnie z poczynionym założeniem, jest to stan alarmowy, w którego następstwie powinno wystąpić wyłączenie przenośnika. Zaciemnione pole związane jest z numerem odcinka, w którym to zdarzenie wystąpiło.

W tym samym pasku macierzy znajdują się pola (o mniejszej szerokości) na granicy połączeń (poz. 4). Zaciemnienie tego pola jest także stanem alarmowym, informującym o zmianie długości sygnału wygenerowanego przez połączenie, co jest spowodowane wzajemnym przemieszczeniem się końców łączonych odcinków taśmy. Zaciemnione pole jest skorelowane z numerem połączenia.

Równoczesne pojawienie się zaciemnienia w pasku (poz. 3) i na numerze sekcji pomiarowej (poz. 5) informuje o wygenerowaniu sygnału od pękniętego breakera, będącego następstwem przerwanej taśmy wzdłuż jej długości. Stanowi to również sygnał alarmowy powodujący natychmiastowe zatrzymanie przenośnika i ingerencję we wskazanym przez macierz miejscu taśmy.

Sytuacje alarmowe występujące podczas badania taśmy przenośnikowej z linkami stalowymi są generowane przez system pomiarowy i w odpowiedni sposób graficzny przedstawiane na analizatorze uszkodzeń.

Wydłużenie połączenia pomiędzy poszczególnymi odcinkami taśmy mające wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji przenośnika taśmowego przedstawione jest na analizatorze uszkodzeń dodatkowo w następującej postaci (rys.7.25, 7.26, 7.27):

Alarmy		WYNIK
Rozciągnięcie	!	STAN
Przerwanie	- OK	KASUJ
Rozprucie	- OK	MENU

**Rys. 7.25. Alarm związany z wydłużeniem połączenia
(rozciągnięcie połączenia)**

Intensywna praca przenośnika taśmowego, prowadzenie ciągną po krążnikach, a także przeginanie taśmy na bębnach napędowych, napinających i kierunkowych powodują zmęczeniowe pękanie drutów w linkach stalowych zawulkanizowanych w gumie. Najbardziej niebezpieczną sytuacją jest zmiana przekroju metalicznego linek w całym jej przekroju taśmy. Widok ekranu z sygnalizacją sytuacji przedstawiony zostaje na analizatorze uszkodzeń jak na rysunku 7.26.

Alarmy		WYNIK
Rozciągnięcie	- OK	STAN
Przerwanie	!	KASUJ
Rozprucie	- OK	MENU

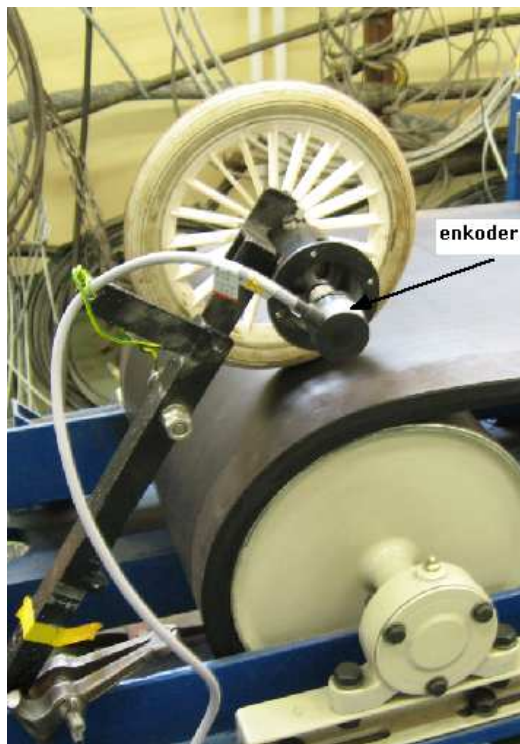
**Rys. 7.26. Alarm związany ze zmianą przekroju metalicznego
(przerwanie drutów linek w każdej sekcji pomiarowej)**

Kolejnym uszkodzeniem związanym z eksploatacją taśm przenośnikowych jest wzdlużne przecięcie taśmy. Wraz z rozerwaniem warstwy zawulkanizowanej gumy uszkodzeniu ulegają poprzeczne stalowe wzmocnienia tak zwane breakery, usytuowane nad linkami stalowymi. System pomiarowy również reaguje na tego typu uszkodzenia, sygnalizując ten stan na analizatorze uszkodzeń (rys. 7.27).

Alarmy		WYNIK
Rozciągnięcie	- OK	STAN
Przerwanie	- OK	KASUJ
Rozprucie	!	MENU

Rys. 7.27. Alarm związany z przecięciem taśmy

W celu ułatwienia lokalizacji uszkodzeń występujących wzdłuż długości taśmy przenośnikowej podczas badania taśmy transporterowej musi zostać zamontowany enkoder (rys.7.28).



Rys. 7.28. Widok enkodera na badanej taśmie podczas badań laboratoryjnych

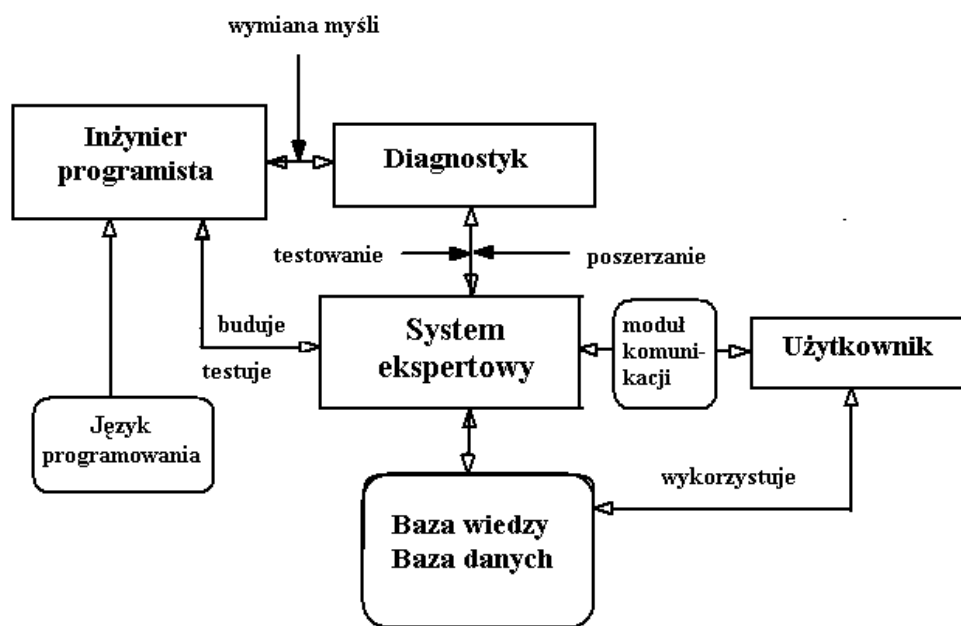
Przedstawiony system diagnostyczny składający się z części mechanicznej i elektronicznej wraz ze stosownym oprogramowaniem jest systemem ekspertowym.

W skład architektury ekspertowego systemu diagnostycznego taśm z linkami stalowymi wchodzi następujące podstawowe elementy:

- baza wiedzy o rejestrowanych sygnałach: amplituda, kształt, czas trwania, rozkład wzdłuż długości i szerokości taśmy wraz z elementami logiki rozmytej i sieci neuronowej,
- baza danych zawierająca fakty z dziedziny wiedzy zawartej w bazie wiedzy, współczynniki przynależności, prędkość taśmy, liczba odcinków taśmy, symptomy uszkodzeń na przykład liczba uszkodzeń, intensywność występowania uszkodzeń jednocześnie w poprzek taśmy, sygnały wzorcowe połączeń,
- procedury wnioskowania – system wnioskujący o stanach awaryjnych takich jak przecięcie wzdłużne taśmy, wydłużenie połączenia, pęknięcia linek w całym przekroju taśmy,
- moduł komunikacji z użytkownikiem – procedury sterowania dialogiem – procedury wejścia / wyjścia umożliwiające formułowanie zadań przez użytkownika i przekazywanie

- rozwiązania przez program - ekran z macierzą symptomową, regulowany poziom rejestracji sygnałów, regulowany czas trwania sygnału;
- procedury umożliwiające rozszerzenie oraz modyfikację wiedzy – pozyskiwanie wiedzy.

Jednostką umożliwiającą wymianę informacji między człowiekiem a maszyną jest interfejs, którego forma ma duży wpływ na jakość udzielanych ekspertyz, ponieważ łatwość obsługi i umiejętność porozumienia z użytkownikiem stanowią klucz do rozwiązania problemów. Strukturę systemu ekspertowego przedstawiono na rysunku 7.29.



Rys. 7.29. Struktura systemu ekspertowego

Zaproponowany system ekspertowy, dając pełną i kompetentną analizę stanów awaryjnych i ułatwiając człowiekowi podejmowanie decyzji w sytuacjach zagrożenia, pozwala na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa eksploatacji przonośnika.

8. Weryfikacja parametrów metrologicznych systemu pomiarowego

W przedstawionym w rozdziale siódmym analizatorze stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi w sposób ciągły zliczane są informacje o ich stanie technicznym. Na bieżąco analizowany jest rozkład pojawiających się uszkodzeń zarówno wzdłuż jej długości jak i szerokości. Analizowane są w czasie rzeczywistym stany awaryjne opisane w rozdziale siódmym.

Pomimo, że badania magnetyczne taśm przenośnikowych z linkami stalowymi są wykonywane od kilkudziesięciu lat [7, 8, 9, 10, 11], problem oceny ilościowej bezpieczeństwa ich pracy nie jest do końca rozwiązany.

Niejednokrotnie w trakcie badań uzyskiwano zapisy występujących uszkodzeń, które trudno było zinterpretować jednoznacznie. Zarejestrowane sygnały były bardzo zbliżone do siebie pod względem kształtu, trudno było ustalić, czy jest to pęknięcie drutu w splotce, czy też jej deformacja [19]. Dlatego też zajęto się analizą wpływu rodzaju zamodelowanego uszkodzenia na kształt sygnału.

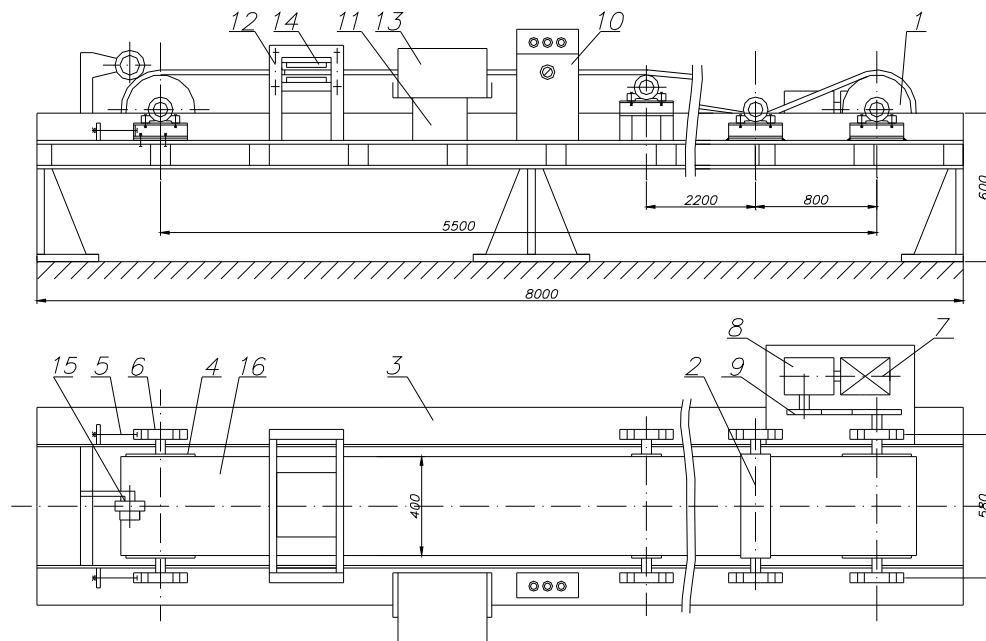
8.1. Badania laboratoryjne

Do zweryfikowania przyjętych wcześniej założeń oraz sprawdzenia poprawności działania wykonanej aparatury należało przeprowadzić badania w warunkach laboratoryjnych. W tym celu przygotowano stanowisko pomiarowe składające się z napędu oraz taśmy z zamodelowanymi przez autora wcześniej uszkodzeniami.

Dla jednoznacznej i dokładnej interpretacji wyników zrodziła się koncepcja zamodelowania wszystkich możliwych uszkodzeń, jakie mogą wystąpić w linkach, zarówno na etapie projektowania, jak i późniejszej eksploatacji.

Na linkach o średnicy 6 mm i konstrukcji 6x7 + IWS zamodelowano szereg uszkodzeń oraz deformacji i na tej podstawie analizowano otrzymany sygnał.

Badania laboratoryjne systemu diagnostyki taśm przenośnikowych wykonano na odpowiednio opracowanym stanowisku zbudowanym w laboratorium Katedry Transportu Linowego AGH w Krakowie. Schemat opracowanego przeze mnie stanowiska do kalibracji głowic do badań magnetycznych taśm przenośnikowych przedstawiono na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Schemat stanowiska pomiarowego

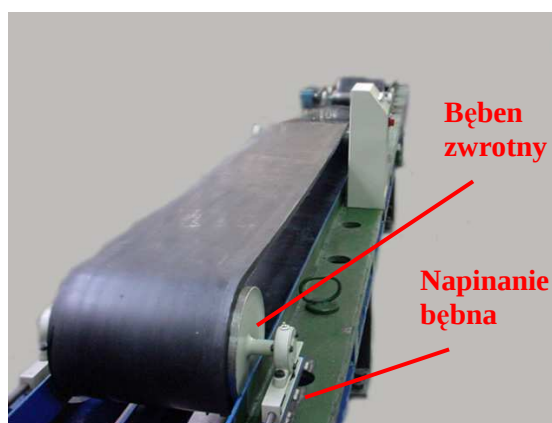
W skład stanowiska pomiarowego wchodzi następujące elementy:

1. bęben napędowy,
2. rolki odchylające,
3. rama,
4. bęben zwrotny,
5. napinacz śrubowy,
6. łożyska,
7. silnik,
8. przekładnia kątowa,
9. przekładnia łańcuchowa,
10. szafa sterownicza,
11. półka pod defektograf,
12. rama mocująca głowicę pomiarową,
13. defektograf,
14. głowica pomiarowa,
15. rolka kompensacyjna,
16. badana taśma.

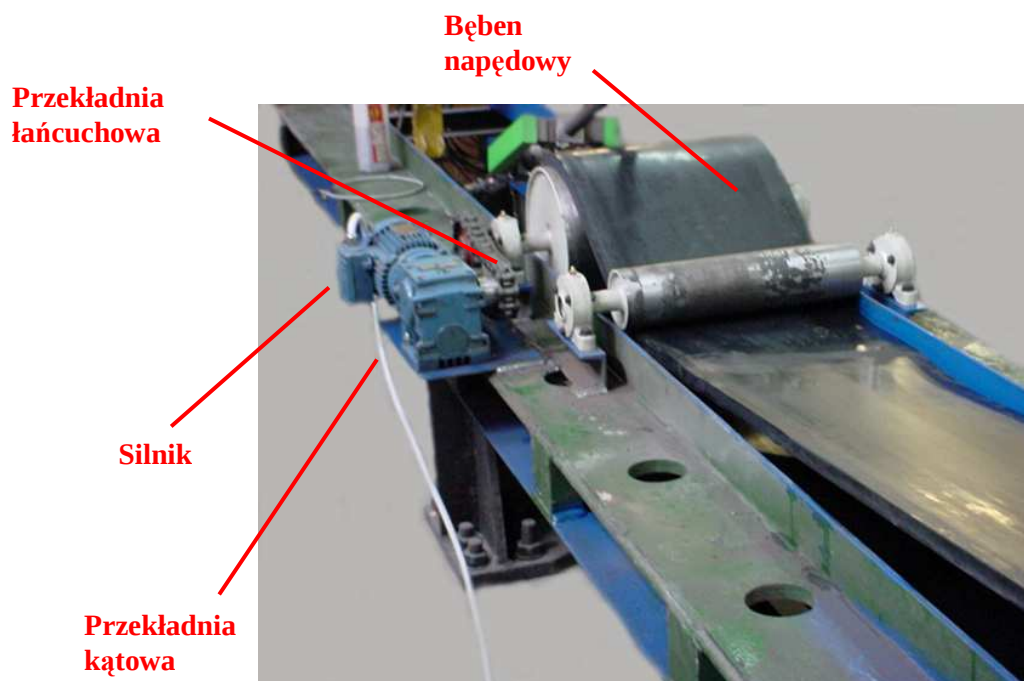
Dla opracowanego stanowiska zbudowanego a Katedrze Transportu Linowego założono następujące parametry:

- szerokość taśmy $B = 400 \text{ mm}$,
- odległość między bębniami $L = 5500 \text{ mm}$.

Poniżej na zdjęciach przedstawiono poszczególne elementy stanowiska pomiarowego do kalibracji głowic pomiarowych i badania taśmy z linkami stalowymi. Jako główny element konstrukcyjny stanowiska wykorzystano istniejący w laboratorium układ elementów stalowych będących fragmentami maszyny zrywającej.



Rys. 8.2. Widok bębna zwrotnego z napinaniem



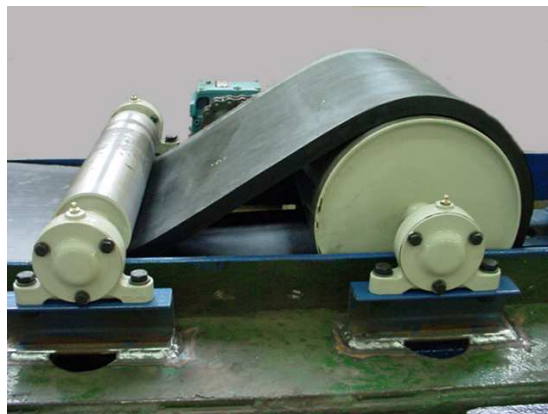
Rys. 8.3. Widok napędu

Dane techniczne napędu (rys. 8.3.):

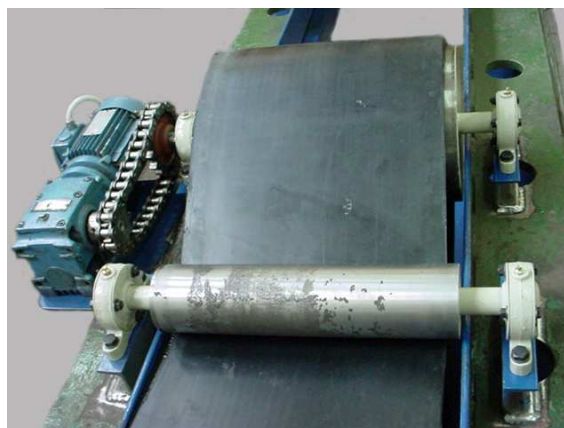
- silnik elektryczny 3-fazowy: moc $P = 0.7 \text{ kW}$, prędkość obrotowa $n = 1400 \text{ obr/min}$,
- przekładnia kątowa: przełożenie $i = 26$,
- przekładnia łańcuchowa: przełożenie $i = 1.3$.



Rys. 8.4. Widok testowanego segmentu głowicy pomiarowej



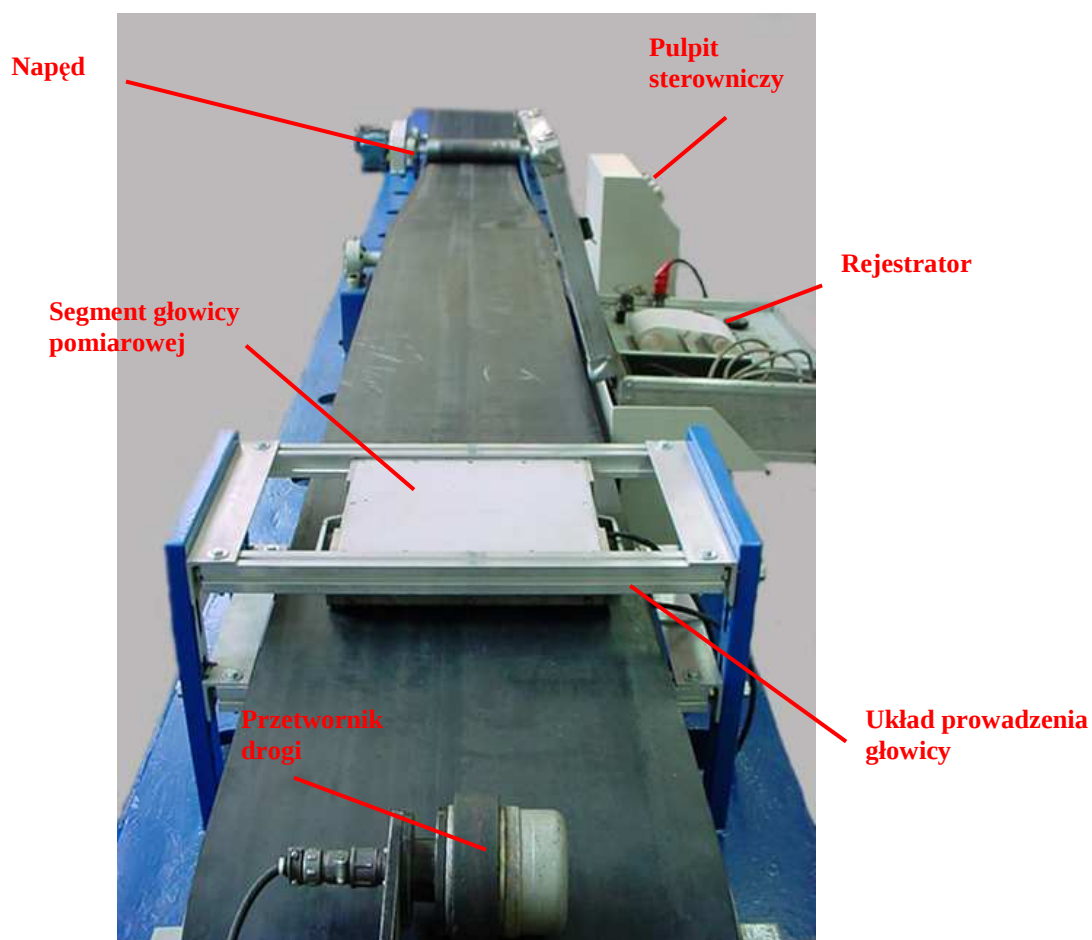
Rys. 8.5. Widok bębna napędowego i rolki prowadzącej



Rys. 8.6. Widok silnika z przekładnią kątową



Rys. 8.7. Widok stanowiska podczas badania segmentu głowicy pomiarowej



Rys. 8.8. Widok stanowiska

Celem zweryfikowania prawidłowej pracy systemu pomiarowego należało zamodelować szereg uszkodzeń na taśmie przenośnikowej o szerokości 400 mm. Na linkach

o średnicy $\varnothing = 6$ mm i konstrukcji 6 x 7 + IWS wykonano następujące rodzaje uszkodzeń (wybór uzasadniony procesami zachodzącymi w linkach podczas eksploatacji):

1. pęknięta linka,
2. pęknięta splotka (7 drutów),
3. pęknięcie 4 drutów,
4. przerwany rdzeń,
5. pęknięcie 7 drutów na powierzchni linki,
6. pęknięcie 14 drutów na powierzchni linki,
7. zbliżenie 4 linek,
8. zbliżenie 6 linek,
9. 4 linki bliżej powierzchni taśmy,
10. pęknięte 4 sąsiednie splotki,
11. pęknięte 6 splotek na granicy sekcji,
12. pęknięte 6 splotek,
13. co 10 cm pęknięta 1 splotka w 4 miejscach,
14. co 5 cm pęknięta 1 splotka w 4 miejscach,
15. co 10 cm pękniętych 10 drutów (4 miejsca),
16. co 2,5 cm pęknięte 5 drutów (7 miejsc),
17. zmiana geometrii linki w całym przekroju na długości 5 cm,
18. starcie 3 linek na długości 20 cm,
19. starcie szlifierką tarczową na całej szerokości,
20. zmiana geometrii linki w całym przekroju na długości 10 cm.

Poniżej na zdjęciach przedstawiono sposób wykonania niektórych z wyżej wymienionych uszkodzeń.



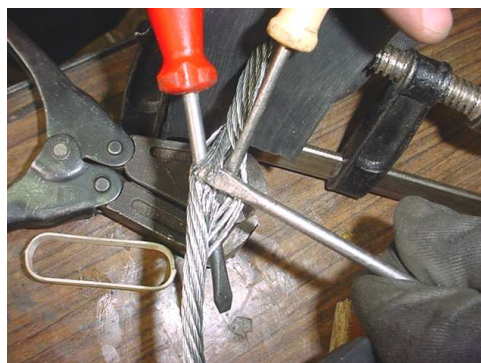
Rys. 8.9. Widok uszkodzenia 1 – pęknięta linka



Rys. 8.10. Widok uszkodzenia 2 – pęknięta splotka (7 drutów)



Rys. 8.11. Widok uszkodzenia 3 – pęknięcie 4 drutów



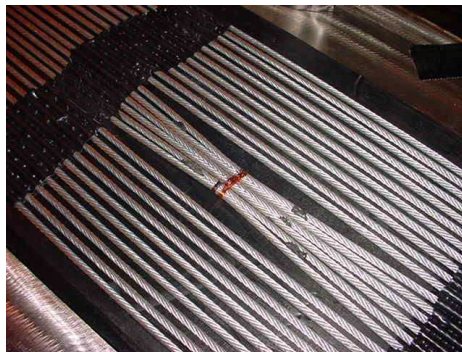
Rys. 8.12. Widok uszkodzenia 4 – wykonanie modelu pękniętego rdzenia



Rys. 9.13. Uszkodzenie 5 – pęknięcie 7 drutów na powierzchni linki



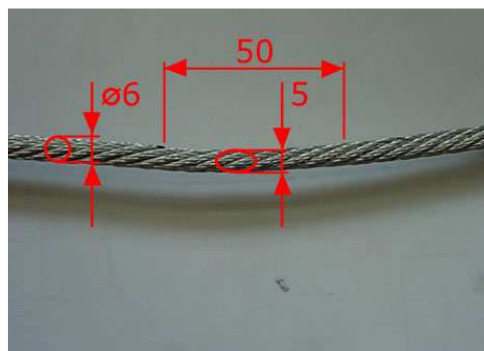
Rys. 8.14. Widok uszkodzenia 6 – pęknięcie 14 drutów na powierzchni linki



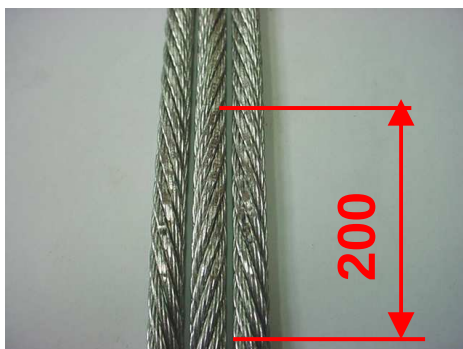
Rys. 8.15. Widok uszkodzenia 7 – 4 linki razem



Rys. 8.16. Widok uszkodzenia 10 – pęknięte 4 sąsiednie splotki



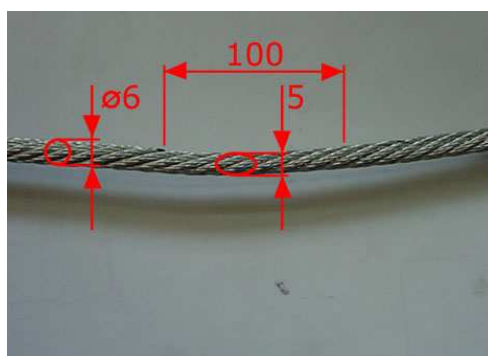
Rys. 8.17. Widok uszkodzenia 17 – zmiana geometrii linkiw całym przekroju na długości 5 cm



Rys. 8.18. Widok uszkodzenia 18 – starcie 3 linek na długości 20 cm



Rys. 8.19. Widok uszkodzenia 19 – starcie szlifierką tarczową na całej szerokości taśmy



Rys. 8.20. Widok uszkodzenia 20 – zmiana geometrii linki w całym przekroju na długości 10 cm

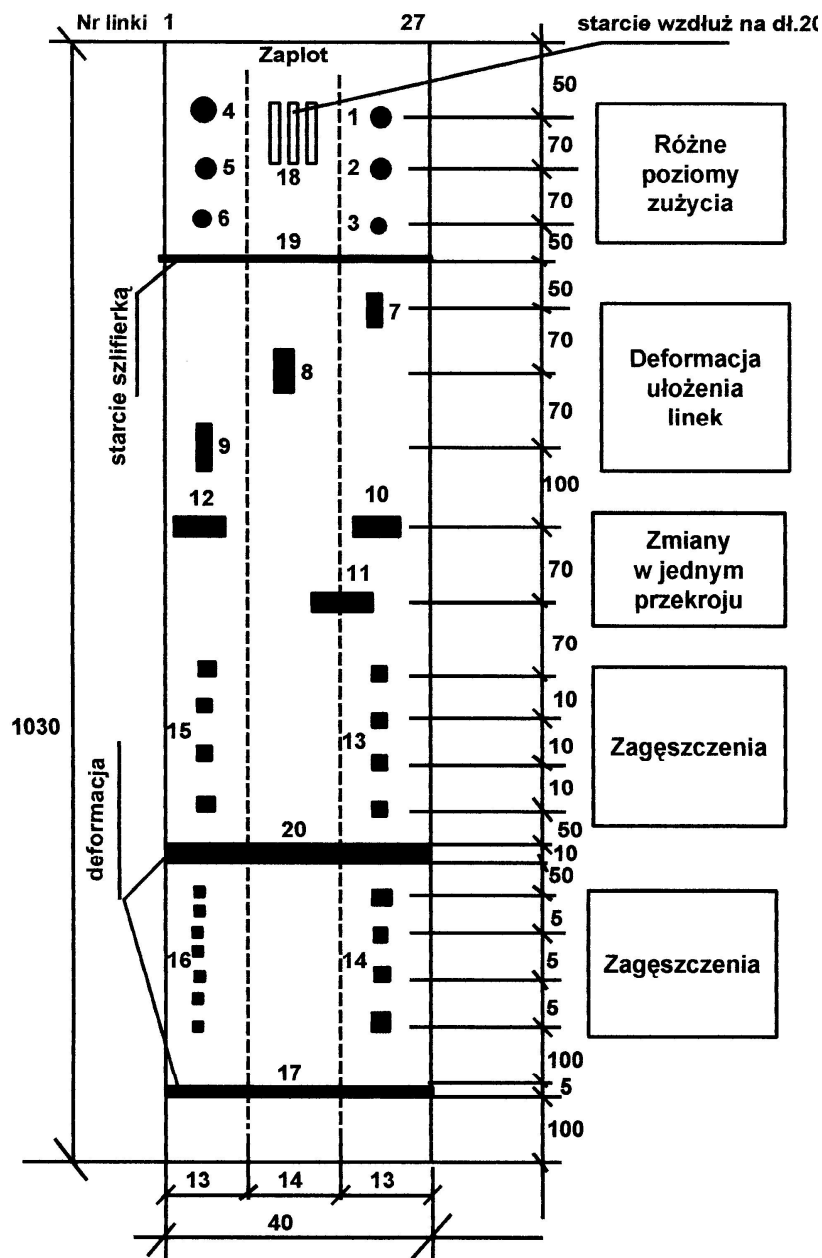
Po wykonaniu modeli uszkodzeń linki stalowe zostały odpowiednio oznaczone (rys. 8.21, 8.22) następnie rozmieszczone w kolejności zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 8.23.



Rys. 8.21. Rozmieszczenie modeli poszczególnych uszkodzeń wg schematu



Rys. 8.22. Oznaczenie poszczególnych linek



Rys. 8.23. Schemat rozmieszczenia zamodelowanych uszkodzeń linek stalowych w taśmie bez końca

Wykaz oznaczeń zamodelowanych uszkodzeń w taśmie bez końca (wg powyższych oznaczeń):

Grupa I (zmiana przekroju):

1. pęknięta linka,
2. pęknięta splotka (7 drutów),
3. pęknięcie 4 drutów,
4. pęknięcie 14 drutów zewnątrz,

5. pęknięcie 7 drutów zewnątrz,
6. pęknięty rdzeń.

Grupa II (deformacja linek):

7. 4 linki razem,
8. 6 linek razem,
9. 4 linki bliżej góry taśmy.

Grupa III (zmiany w jednym przekroju):

10. pęknięte 4 sąsiednie splotki,
11. pęknięte 6 splotek na granicy sekcji,
12. pęknięte 6 splotek.

Grupa IV (zagęszczenia):

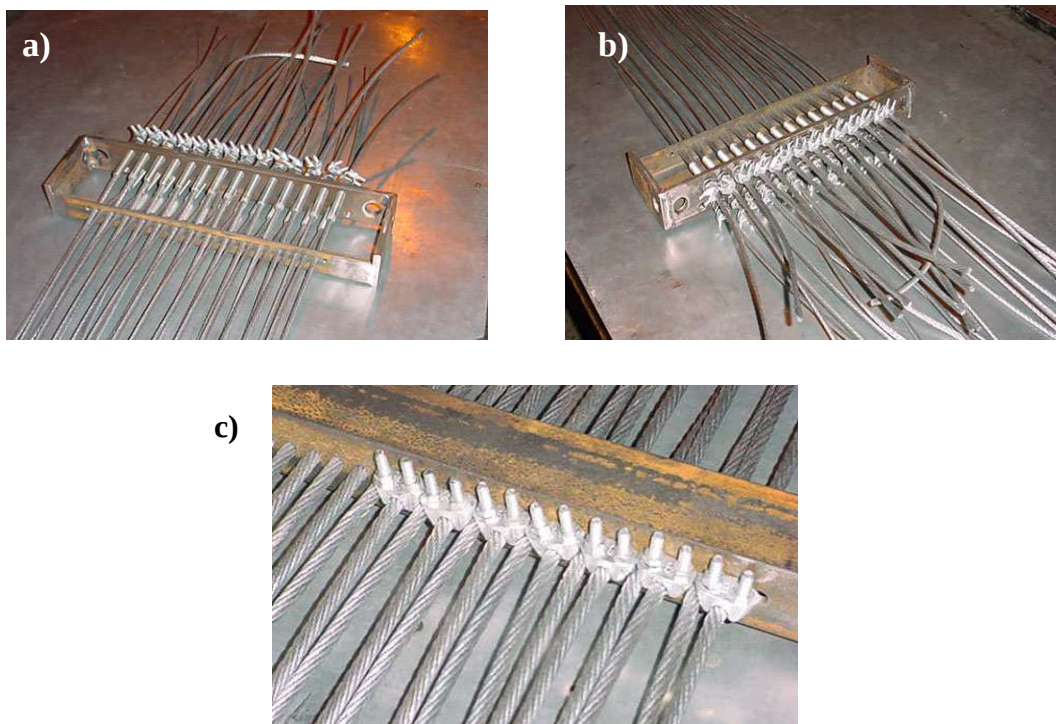
13. co 10 cm pęknięta 1 splotka (4 miejsca),
14. co 5 cm pęknięta jedna splotka (4 miejsca),
15. co 10 cm pękniętych 10 drutów (4 miejsca),
16. co 2,5 cm pęknięte 5 drutów (7 miejsc),
17. zmiana geometrii w całym przekroju na dł. 50 mm,
18. starcie 3 linek na dł. 200 mm,
19. starcie szlifierką tarczową na całej szerokości,
20. zmiana geometrii w całym przekroju na długości 100 mm.

Taśmę z zamodelowanymi uszkodzeniami wykonano w Fabryce Taśm Transporterowych Stomil Wolbrom. Ze względu na niewielkie gabaryty (szerokość taśmy – 400 mm) taśma wykonana została na stanowisku przeznaczonym do produkcji taśm tkaninowo-gumowych (rys 8.24).



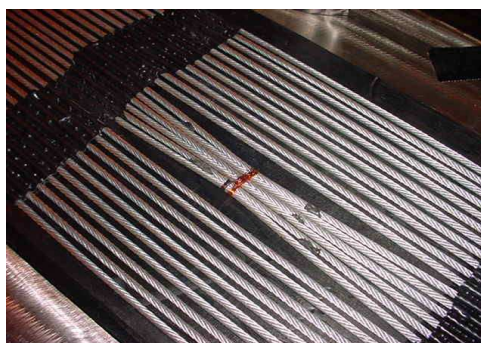
Rys. 8.24. Widok ułożenia linek na stole montażowym

Z powodu braku możliwości technologicznych napięcia linek stalowych podczas wulkanizacji wykonano specjalnie do tego celu napinacz linek stalowych (rys. 8.25 a, b, c).



Rys. 8.25. Napinanie linek stalowych

Każda z linek została wstępnie napięta w celu zachowania wzajemnej równoległości. Wykonana taśma składa się z 27 linek stalowych rozmieszczonych w trzech sekcjach (po dziewięć w sekcji). Ułożone w odpowiedniej kolejności linki stalowe po odpowiednim napięciu zawulkanizowano w gumie, w sposób analogiczny jak w przypadku produkcji taśmy przenośnikowej z linkami stalowymi (rys. 8.26).

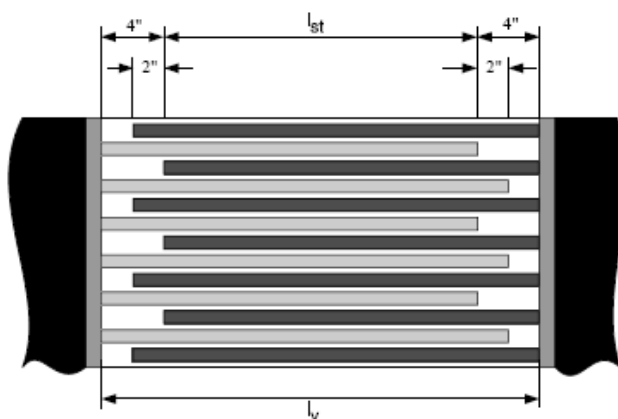


Rys. 8.26. Widok ułożenia linek stalowych przed wulkanizacją



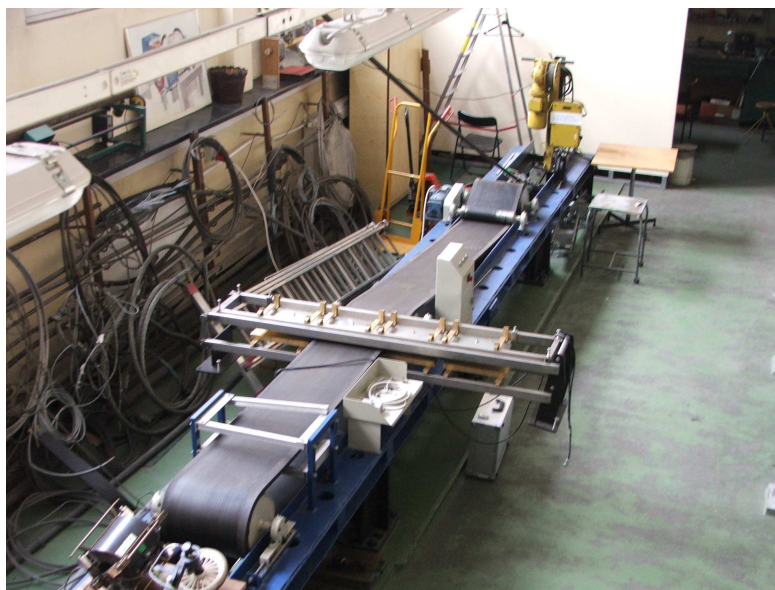
**Rys. 8.27. Wulkanizacja linek stalowych w gumie
(w warunkach przemysłowych)**

Po wykonaniu taśmy należało ją połączyć. Zastosowano połączenie jednostopniowe wg poniższego schematu przedstawionego na rysunku 8.28.



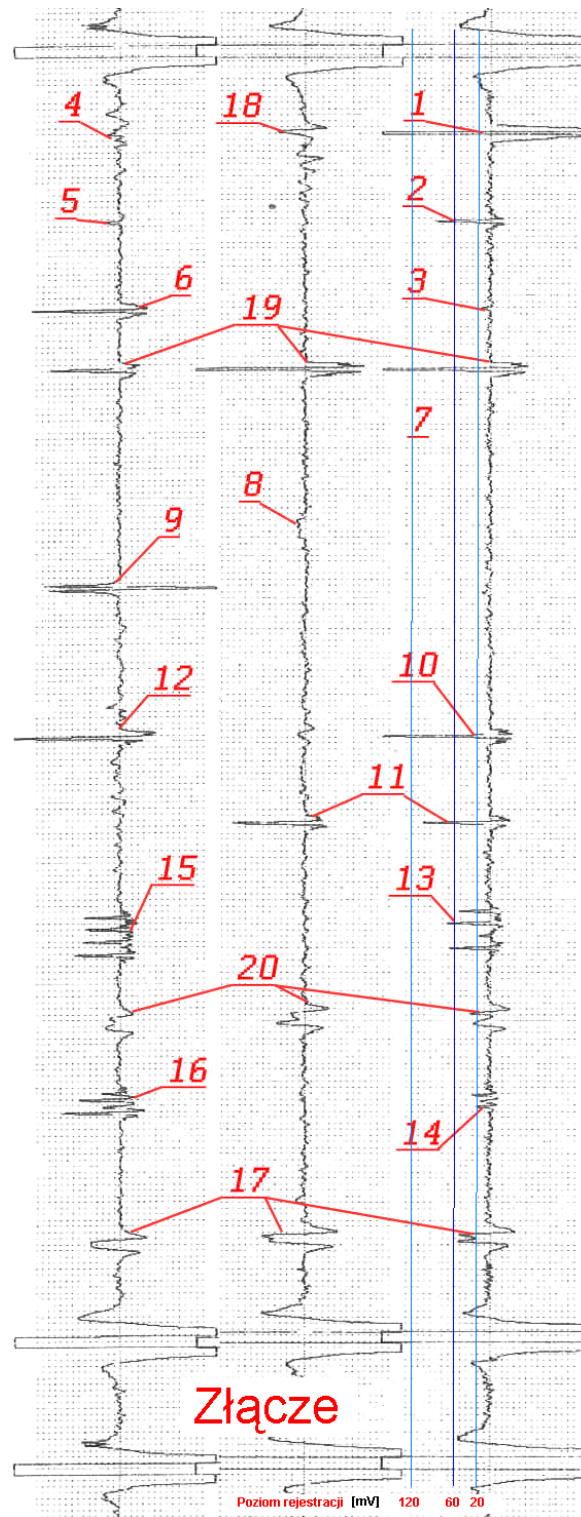
Rys. 8.28. Schemat połączenia jednostopniowego [34]

Tak przygotowana taśma, z zamodelowanymi uszkodzeniami, została przebadana za pomocą systemu pomiarowego zainstalowanego na stanowisku w laboratorium Katedry Transportu Linowego przedstawionym na rysunku 8.29.



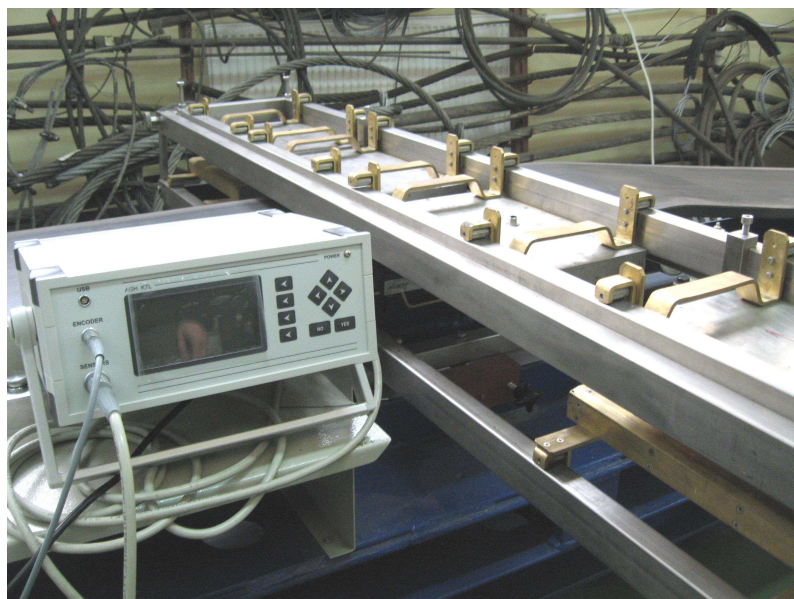
Rys. 8.29. Widok stanowiska pomiarowego w czasie badań laboratoryjnych

Badanie taśmy z zamodelowanymi uszkodzeniami rozpoczęto od zarejestrowania sygnałów otrzymanych podczas ruchu taśmy przez głowicę pomiarową. Do zapisu danych otrzymanych w trakcie przemieszczania się taśmy względem głowicy pomiarowej wykorzystano defektograf MD 120, standardowo stosowany podczas badań magnetycznych lin stalowych. W wyniku tego otrzymano defektogram przedstawiony na rysunku 8.30, przedstawiający sygnały wygenerowane podczas badania taśmy, odpowiadające poszczególnym zamodelowanym uszkodzeniom linek stalowych zawulkanizowanych w taśmie według schematu przedstawionego na rysunku 8.23 i opisu zawartego w tekście.



Rys. 8.30. Defektogram z badania taśmy z zamodelowanymi uszkodzeniami

Kolejnym krokiem badań laboratoryjnych było badanie taśmy z zamodelowanymi uszkodzeniami za pomocą analizatora uszkodzeń sprzężonego z głowicą pomiarową zainstalowaną na taśmie przenośnikowej. Widok systemu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 8.31.



Rys. 8.31. Widok systemu pomiarowego w czasie badań laboratoryjnych

Wynikiem badania taśmy z zamodelowanymi uszkodzeniami była symptomowa macierz uszkodzeń wygenerowana na monitorze analizatora uszkodzeń. Na rysunku 8.32 przedstawiono zarejestrowaną macierz uszkodzeń na ekranie analizatora uszkodzeń.

Sekcja	Odcinek taśmy		
		1...2	2...3
	1	10	9
	2	11	8

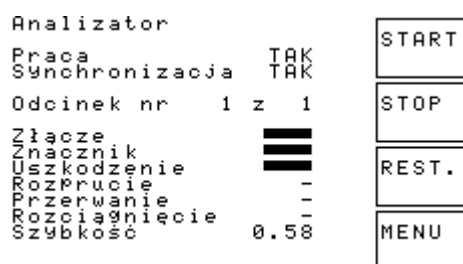
Rys. 8.32. Wygenerowana macierz uszkodzeń

Należy tutaj wspomnieć, że podczas pierwszego przejazdu taśmy przez głowicę pomiarową musi nastąpić zlokalizowanie znaczników zawulkanizowanych w gumie, służących do określenia początku sekcji pomiarowej. Zanim to nastąpi na ekranie analizatora uszkodzeń obserwujemy obraz:

Analizator		START
Praca	TAK	
Synchronizacja	NIE	STOP
Odcinek nr	1	
Złaczanie	--	REST.
Znacznik	--	
Uszkodzenie	--	
Przerwanie	--	
Przociąganie	--	
Szybkość	1.26	MENU

Rys. 8.33. Wydruk z ekranu analizatora

Zlokalizowanie znaczników powodują zmianę pojawiającą się na ekranie analizatora. Wówczas to system lokalizuje początek sekcji pomiarowej oraz ilość połączeń występujących w badanej taśmie.



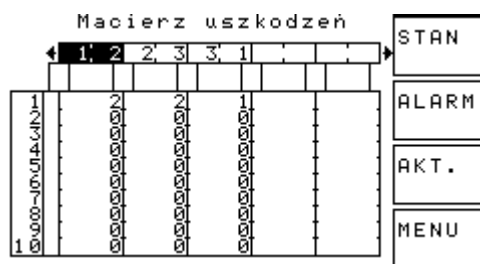
Rys. 8.34. Wydruk z ekranu analizatora

Przed rozpoczęciem badania taśmy należy w menu analizatora wpisać odpowiednie ustawienia, aby wykonany pomiar był jak najbardziej wiarygodny. Dokonuje się tego na ekranie analizatora. Widok menu analizatora został pokazany na rysunku poniżej.



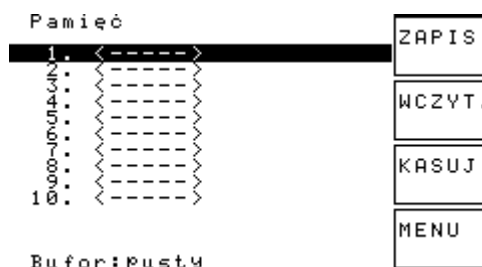
Rys. 8.35. Widok menu analizatora

Nastawy związane są z przewidywanymi wartościami sygnałów generowanymi w trakcie pomiarów oraz czasem ich trwania. Podczas przejazdów taśmy poprzez zespół pomiarowy zostaje wygenerowana macierz uszkodzeń przedstawiona na rysunku 8.36.



Rys. 8.36. Widok macierzy uszkodzeń na ekranie analizatora

Wygenerowane podczas badania taśm dane z pomiarów są zapisywane do pamięci analizatora uszkodzeń i mogą być w późniejszym czasie analizowane przez diagnostyków zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i na rzeczywistym obiekcie.



Rys. 8.37. Ekran zapisu danych w analizatorze

8.2. Badania przemysłowe głowicy segmentowej

Próby przemysłowe głowicy segmentowej wykonano przy okazji przeprowadzania rutynowych badań stanu technicznego taśm w kopalni KWK Marcel w Rybniku. Miejsce zamontowania sprzętu pomiarowego przedstawiono na rysunku 8.38 i 9.40. Z uwagi na ograniczony czas dostępu do przenośnika taśmowego nie testowano analizatora uszkodzeń. W analizatorze należy ustawić poziomy rejestracji dla każdego kanału osobno, co jest dość czasochłonne.

Głowice segmentowe zamontowano na dolnym biegu taśmy tuż za napędem. W tym miejscu taśma zbiegająca z bębnow napędowych nie jest przeginana na krążnikach i zachowuje płaską powierzchnię. Dodatkowo do zniwelowania drgania obrzeży taśmy, obecnego podczas pracy przenośnika taśmowego KWK Marcel, zastosowano rolkę dociskową, zamontowaną tuż obok ramy nośnej. Jej obecność gwarantowała niwelację ewentualnie powstałej niecki na taśmie.

Sygnały z głowicy segmentowej były rejestrowane przy użyciu defektografu MD 120 (rys 8.41) oraz rejestratora ośmiokanałowego (rys. 8.42) typu Heoki 3353 zmodernizowanego w firmie NDT Zawada. Częstotliwość próbkowania sygnału rejestrowanego z użyciem defektografu MD 120 wynosiła 400 Hz. Badanie wykonano przy prędkości przesuwu wynoszącej 1 m/s, co pozwoliło na zbieranie informacji o stanie linek stalowych co 2,5 mm (przy dwu kanałach rejestracyjnych). Przy zastosowaniu rejestratora ośmiokanałowego częstotliwość próbkowania wynosiła 1,5 kHz, co przy prędkości taśmy ok. 4 m/s pozwoliło również na zbieranie informacji co 2,7 mm. Z porównania uzyskanych defektogramów [25] można wnioskować, że dobór częstości próbkowania w analizatorze uszkodzeń można określić według zależności:

$$F = \frac{V}{2,5} [Hz]$$

gdzie:

V – prędkość ruchu taśmy w mm/s

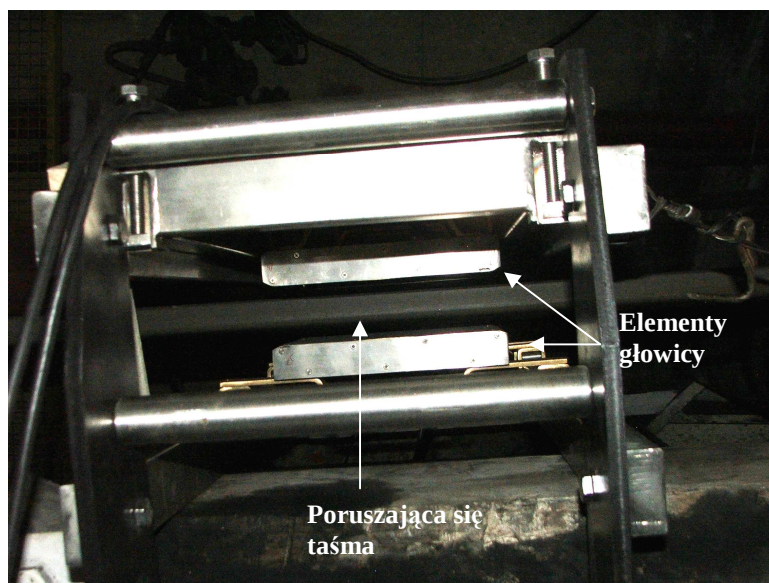
Zarejestrowane za pomocą rejestratora ośmiokanałowego sygnały posłużyły do testowania analizatora uszkodzeń w warunkach laboratoryjnych. Liczba uszkodzeń zarejestrowanych w macierzy uszkodzeń odpowiadała liczbie uszkodzeń zarejestrowanych na defektogramach rejestratora MD 120, co potwierdziło poprawność działania analizatora.

Z uwagi na dobry stan badanej taśmy w kopalni Marcel nie stwierdzono występowania stanów awaryjnych.



Rys. 8.38. Widok systemu pomiarowego na rzeczywistym obiekcie

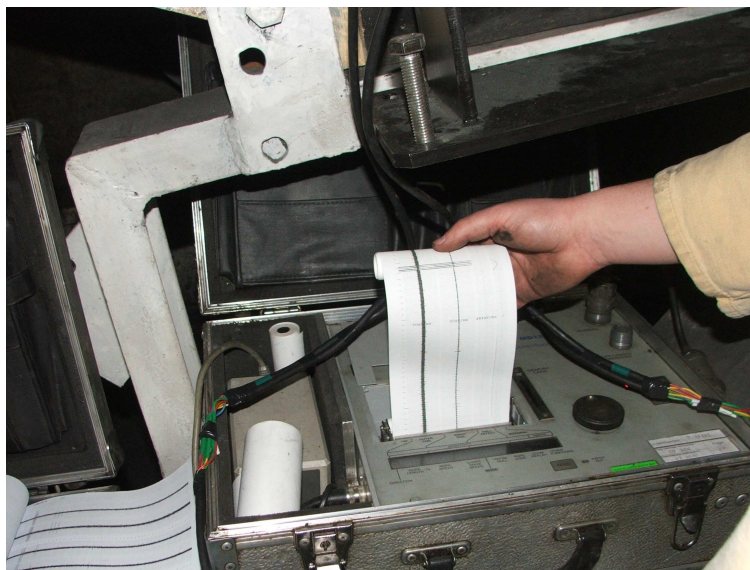
Na rysunku 8.39 pokazano widok ramy głowicy z segmentami pomiarowymi ułożonymi po obu stronach poruszającej się pomiędzy nimi taśmy z linkami stalowymi. Należy tutaj dodać że odległość pomiędzy poruszającą się taśmą a segmentami głowicy musi mieć określoną wartość, ponieważ zmiana odległości wpływa na wartość zmierzonego sygnału podczas badania, co zostało przedstawione w rozdziale 7.1.



Rys. 8.39. Widok taśmy pomiędzy elementami głowicy



Rys. 8.40. Schemat montażu segmentowej głowicy pomiarowej na rzeczywistym obiekcie



Rys. 8.41. Rejestracja sygnału defektografem MD 120



Rys. 8.42. Widok rejestratora ośmiokanałowego

Analiza zapisów wykonanych z wyżej wymienionych rejestratorów oraz obraz macierzy uzyskanej z analizatora systemu diagnostycznego (rys. 8.43) wykazały zbieżność liczby zarejestrowanych sygnałów wygenerowanych przez pęknięcia znajdujące się w linkach stalowych zawulkanizowanych w badanej taśmie przenośnikowej.

		odcinek taśmy													
Sekcja		1...2	2...3	3...4	4...5	5...6	6...7	7...8	8...9	9...10	10...11	11...12	12...13	13...14	14...15
	1	24	25	1	4	16	38	10	4	16	42	75	3	10	6
	2	5	2	0	1	2	2	4	3	2	0	0	1	2	2
	3	0	1	0	2	3	3	1	0	4	1	1	6	1	2
	4	5	6	0	1	3	3	3	1	4	0	4	1	4	4
	5	9	27	0	21	16	10	12	6	9	2	25	19	11	16
	6	6	9	0	1	15	13	2	5	6	1	13	20	1	0
	7	2	4	0	2	6	8	1	4	5	2	3	11	3	0
	8	2	2	0	3	4	38	2	2	2	2	1	1	2	1
	9	2	2	0	68	14	43	0	1	8	1	0	3	1	1
	10	5	21	1	46	142	90	18	38	7	16	10	4	16	16

Rys. 8.43. Wygenerowana macierz uszkodzeń

9. Określenie niepewności pomiarowej analizatora

Każdy pomiar fizyczny, dokonany dowolną metodą, obarczony jest błędem pomiarowym, dlatego też wyniki w poszczególnych sekcjach macierzy uszkodzeń mogą różnić się podczas kolejnych przejazdów taśmy przez głowicę pomiarową. Mamy w tym przypadku do czynienia z tak zwaną niepewnością pomiarową.

Występują dwa zasadnicze rodzaje niepewności pomiarowych [12]:

- **niepewności systematyczne**
- **niepewności przypadkowe**

Zwykle w każdym pomiarze występują one łącznie, składając się na tak zwaną niepewność całkowitą.

Niepewności przypadkowe wynikają z równoczesnego działania bardzo wielu niezależnych czynników. Każdy z tych czynników wpływa jedynie nieznacznie na rezultat pomiaru, powodując z prawdopodobieństwem $p = 0,5$ odchylenie wartości pomiaru o małą wartość w górę lub dół. W każdym konkretnym pomiarze nie jest możliwe przewidzenie wielkości i znaku wartości niepewności pomiarowej, ale nie znaczy to, że niepewności nie podlegają żadnym prawom. Prawa te mają charakter statystyczny, tzn. że możemy podać jedynie prawdopodobieństwo wystąpienia wyniku pomiaru. Prawo rozkładu wyników pomiarowych opisuje tzw. rozkład normalny, zwany inaczej rozkładem Gaussa.

Na podstawie analizy liczby sygnałów zliczanych i zobrazowanych w macierzy uszkodzeń określono niepewność pomiarową. Aby ją oszacować do analizy ustalono w analizatorze uszkodzeń trzy poziomy rejestracji: 20, 60 i 120mV powyżej których zliczane były uszkodzenia pochodzące od zamodelowanych uszkodzeń (rys 8.30). Dla każdego z tych poziomów wykonano dziesięć cykli pomiarowych, rejestrując za każdym razem liczbę zliczanych uszkodzeń. Liczby zliczanych uszkodzeń dla ustalonych poziomów rejestracji przedstawiono w tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Liczba uszkodzeń zliczanych w analizatorze (dla wybranych poziomów rejestracji)

Nr cyklu	Poziom rejestracji	> 20 mV	>60 mV	>120 mV
1		9	6	4
2		8	7	5
3		8	7	4
4		9	6	3
5		8	5	5
6		7	6	4
7		10	7	4
8		9	6	5
9		8	6	3
10		8	6	4

Wartość średnią wskazań dla poszczególnych wartości amplitudy obliczono ze wzoru [12]:

$$\bar{t}_x = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n t_{ix}$$

Dla amplitudy >20mV wynosi: $t_x^- = \frac{1}{10} * 84 = 8,4$

Dla amplitudy >60mV wynosi: $t_x^- = \frac{1}{10} * 62 = 6,2$

Dla amplitudy >120mV wynosi: $t_x^- = \frac{1}{10} * 41 = 4,1$

Z tablicy wartości krytycznej t_n wartości rozkładu studenta [12] odczytujemy wartość krytyczną $t_{10} = 1,0585$, a następnie obliczamy kolejno odchylenie standardowe S_t , otrzymując:

- dla amplitud $>20\text{mV}$ ale $<60\text{mV}$:

$$S_t = t_{10} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2}$$

$$S_t = 1,0585 * \sqrt{\frac{1}{10-1} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2} = 0,893$$

- dla amplitud $>60\text{mV}$ ale $<120\text{mV}$:

$$S_t = t_{10} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2}$$

$$S_t = 1,0585 * \sqrt{\frac{1}{10-1} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2} = 0,669$$

- dla amplitud $>120\text{mV}$:

$$S_t = t_{10} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2}$$

$$S_t = 1,0585 * \sqrt{\frac{1}{10-1} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2} = 0,781$$

Oraz odchylenie standardowe średniej arytmetycznej S_t^- , otrzymując:

- dla amplitud $>20\text{mV}$

$$S_t^- = t_{10} * \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2}$$

$$S_t^- = 1,0585 * \sqrt{\frac{1}{90} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2} = 0,282$$

- dla amplitud >60mV

$$S_t^- = t_{10} * \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2}$$

$$S_t = 1,0585 * \sqrt{\frac{1}{90} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2} = 0,212$$

- dla amplitud > 120mV:

$$S_t^- = t_{10} * \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2}$$

$$S_t = 1,0585 * \sqrt{\frac{1}{90} * \sum_{i=1}^n (t_i - t_x^-)^2} = 0,247$$

Oznacza to, że nieznana wartość oczekiwana (czyli rzeczywista wartość), znajduje się z prawdopodobieństwem 98%, w przedziale $8,118 \leq t_x \leq 8,682$ dla czułości pomiarowej poniżej wartości 20mV. Pomiędzy 20 ÷ 60mV przedział wynosi $5,988 \leq t_x \leq 6,412$, natomiast powyżej 60mV przedział wynosi $3,853 \leq t_x \leq 4,347$

W rzeczywistych warunkach pomiarowych można przyjąć, że niepewność pomiarowa będzie się kształtować na poziomie około 10%.

10. Implementacja logiki rozmytej w diagnostyce taśm z linkami stalowymi

Wykorzystane w systemie monitorowania stanu technicznego taśm z linkami stalowymi oprogramowanie pozwala rozwiązywać problemy niepoddające się algorytmizacji w sposób efektywny poprzez wykorzystanie sztucznej inteligencji. Współczesne zastosowania sztucznej inteligencji to:

- technologie oparte na **logice rozmytej** – powszechnie stosowane np. w diagnostyce;

- **systemy ekspertowe** – w wielkim uproszczeniu zawierające „komputerowego doradcę”; który symulując pracę eksperta-diagnostyka mógłby go zastąpić w określonych sytuacjach bądź stać się jego doradcą,
- **sieci neuronowe** – stosowane z powodzeniem w rozpoznawaniu uszkodzeń w diagnostyce.

Wzrost wydajności przenośników taśmowych i ich ciągła praca powoduje potrzebę pozyskiwania bardziej precyzyjnej informacji o stanie technicznym taśmy. Dlatego też pojawiły się rozważania nad łączeniem elementów różnych podejść zastosowania sztucznej inteligencji w diagnostyce. Przedstawione dziedziny badań zaimplementowane w diagnostyce technicznej mogą występować jednocześnie dlatego też postanowiono łączyć je w systemy zwane *hybrydowymi*. Systemy takie wykorzystują elementy kilku metodologii do stworzenia np. klasyfikatora uszkodzeń, który przejmie najlepsze cechy systemów wchodzących w jego skład.

Logika rozmyta (ang. *fuzzy logic*) jest uogólnieniem klasycznej dwuwartościowej logiki, w której zdanie może przyjmować alternatywnie jedną z dwóch wartości – „prawda” albo „fałsz”. Jeżeli zdanie nie posiada jednej z tych właściwości, to automatycznie posiada drugą (prawo wyłączonego środka). W logice rozmytej między stanem 0 (fałsz) a stanem 1 (prawda) rozciąga się szereg wartości pośrednich, które określają stopień przynależności elementu do zbioru. Logikę rozmytą po raz pierwszy przedstawił Lotfi Zadeh w 1965 roku jako formalizację niepewności, to jest zjawiska występowania obiektów, wobec których niektóre określenia stosują się tylko w pewnym stopniu.

Logika rozmyta ma zastosowanie wszędzie tam, gdzie użycie klasycznej logiki stwarza problem ze względu na trudności w zapisie matematycznym procesu lub gdy wyliczenie lub pobranie zmiennych potrzebnych do rozwiązania problemu jest niemożliwe [20, 28].

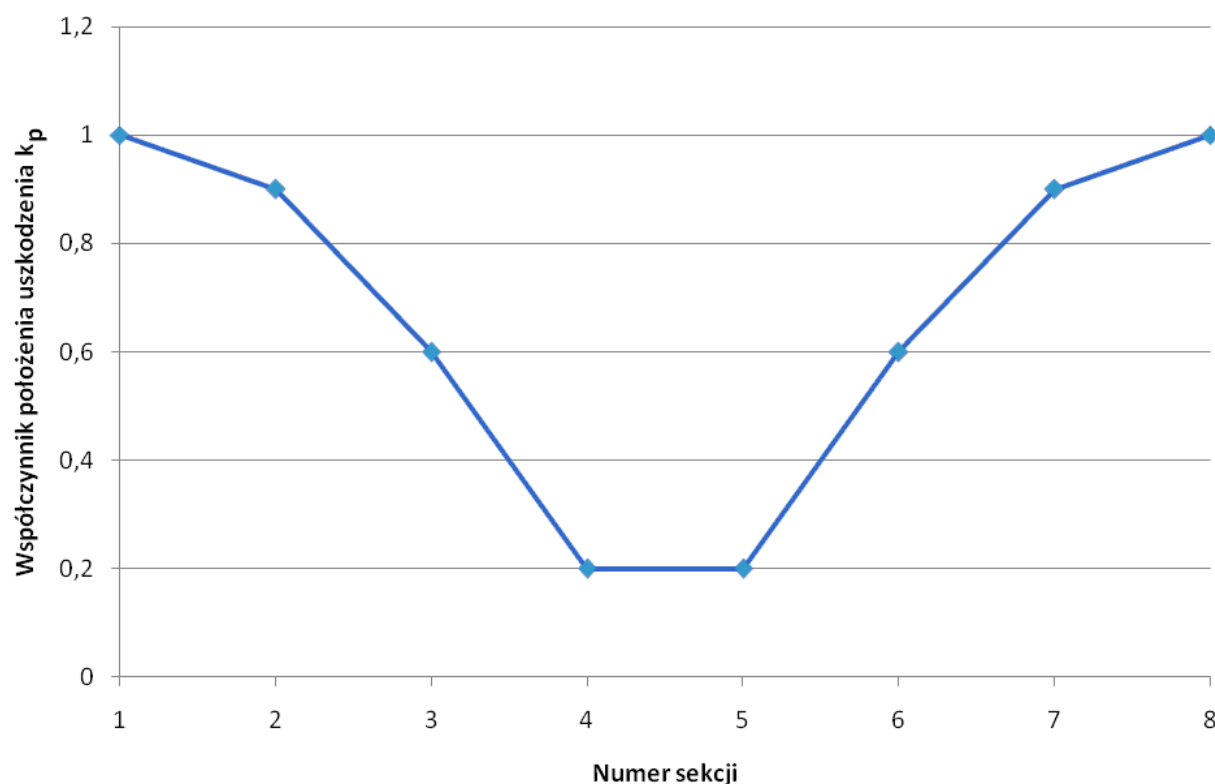
W przypadku taśm przenośnikowych logika rozmyta może być używana przez osoby dokonujące kontroli. Umożliwia ona zobiektywizowanie wyników inspekcji poprzez ilościową ocenę zużycia. Oznacza to, że wyniki zostaną przedstawione w postaci liczby, zwanej wskaźnikiem zużycia taśmy W_z . Wskaźniki te są bardzo istotne dla powyższej metody.

Na podstawie analizy defektogramów z badań magnetycznych taśm przenośników taśmowych eksploatowanych w Kopalni Jankowice oraz KWK Janina z lat 2005 do 2009 zostały sporządzone symptomowe macierze uszkodzeń oraz wykresy rozkładu uszkodzeń na szerokości taśmy. Obliczono także wskaźniki zużycia taśm przenośnikowych stosując

przyjęte w pracy odpowiednie współczynniki. Poniżej zostaną przedstawione wyniki dla odcinka 4 taśmy z przenośnika typu Bogda I.

Na podstawie informacji zawartych w zarejestrowanej macierzy uszkodzeń można określić odpowiednie funkcje przynależności.

- Funkcja położenia uszkodzenia wzdłuż szerokości taśmy (rys. 10.1)



Rys. 10.1. Funkcja położenia uszkodzenia

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów oraz wykresu przedstawionego na rysunku 10.1 można przyjąć, że dla sekcji nr 1 i 8, czyli sekcji położonych na brzegach taśmy wartość współczynnika k_p równa się 1, ponieważ uszkodzenia pojawiające się w tych sekcjach są najbardziej niebezpieczne i często skutkują dalszym postępowaniem uszkodzenia. Dla sekcji 4 i 5, czyli dla środka taśmy przyjęto wartość 0,2 ponieważ uszkodzenia występujące w tych sekcjach nie są aż tak niebezpieczne, co więcej progresja liczby uszkodzeń dla tych sekcji jest niska.

- Standaryzowana funkcja częstości występowania uszkodzeń (rys. 10.2)



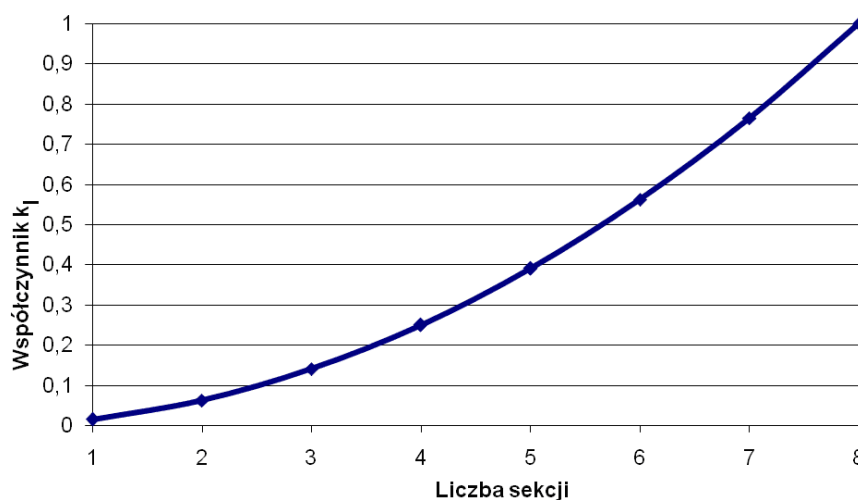
Rys. 10.2. Standaryzowana funkcja częstości występowania uszkodzeń

Zastosowanie tego typu funkcji umożliwia wykrywanie skupisk uszkodzeń. Funkcja ta odnosi liczbę pojawiających się uszkodzeń na 1 sekundę. Rozdzielczość taka jest w zupełności wystarczająca, aby wykrywać nagłe przyrosty liczby uszkodzeń. Wartości, jakie zostały przyjęte dla poszczególnej liczby uszkodzeń na sekundę, nazwane współczynnikiem kumulacji uszkodzeń przedstawia tabela 10.1.

Tabela 10.1. Wartości współczynnika kumulacji uszkodzeń.

Liczba uszkodzeń na sekundę	Wartość współczynnika kumulacji uszkodzeń
20	1
18	0,81
16	0,64
14	0,49
12	0,36
10	0,25
8	0,16
6	0,09
4	0,04
2	0,01
0	0

- Funkcja liczby uszkodzeń pojawiających się jednocześnie w przekroju poprzecznym taśmy (rys. 10.3)



Rys. 10.3. Funkcja liczby sekcji z pojawiającymi się jednocześnie sygnałami

Uszkodzenia pojawiające się jednocześnie w całej szerokości taśmy są jednymi z najniebezpieczniejszych uszkodzeń, ponieważ mogą prowadzić do zerwania całej taśmy w przypadku ich zbagatelizowania. Dlatego też wczesne ich wykrywanie, jak również reagowanie na nie jest rzeczą bardzo istotną w diagnostyce taśm. Funkcja liczby uszkodzeń pojawiających się jednocześnie w przekroju poprzecznym taśmy pozwala na określenie współczynnika istotności dla uszkodzeń pojawiających się jednocześnie w 1, 2, ... 8 sekcjach.

Poza funkcjami przyjętymi dla potrzeb pracy użyteczne również jest przyjęcie innych funkcji przynależności, które jednak zostały pominięte ze względu na możliwości techniczne urządzenia do monitorowania stanu technicznego taśm z linkami stalowymi.

W poniższych tabelach zostały zestawione przykładowe wartości współczynników dla czwartego odcinka taśmy. Kolumny W_p , W_k i W_l , przedstawiają wagi dla współczynników i wynoszą kolejno 0,2; 0,3; 0,5. Kolumny k_p , k_k i k_l , to współczynniki położenia uszkodzenia, kumulacji uszkodzeń oraz liczby sekcji, w których uszkodzenia pojawiają się jednocześnie. Wskaźniki zużycia zostały obliczone ze wzoru:

$$W_Z = W_p \cdot k_p + W_k \cdot k_k + W_l \cdot k_l$$

gdzie:

W_Z – wskaźnik zużycia,

W_p – waga współczynnika położenia uszkodzenia,

k_p – współczynnik położenia uszkodzenia,

W_k – waga współczynnika kumulacji uszkodzeń,

k_k – współczynnik kumulacji uszkodzeń,

W_l – waga współczynnika liczby sekcji, w których pojawiają się uszkodzenia,

k_l – wsp. liczby sekcji, w których pojawiają się uszkodzenia.

Tabela 10.2. Wartości współczynników dla odcinka 4 taśmy przenośnika typu Bogda I z badania w 09.2005

	Liczba uszkodzeń w odcinku 4	W_p	W_k	W_l	k_p	k_k	k_l	W_z
Sekcja 1	1	0,2	0,3	0,5	1	0	0	0,2
Sekcja 2	1	0,2	0,3	0,5	0,9	0	0	0,18
Sekcja 3	8	0,2	0,3	0,5	0,6	0,04	0,002	0,121
Sekcja 4	1	0,2	0,3	0,5	0,2	0	0	0,04
Sekcja 5	1	0,2	0,3	0,5	0,2	0	0	0,04
Sekcja 6	1	0,2	0,3	0,5	0,6	0	0	0,12
Sekcja 7	0	0,2	0,3	0,5	0,9	0	0	0,18
Sekcja 8	6	0,2	0,3	0,5	1	0,02	0,01	0,211

Tabela 10.3. Wartości współczynników dla odcinka 4 taśmy przenośnika typu Bogda I z badania w 12.2005

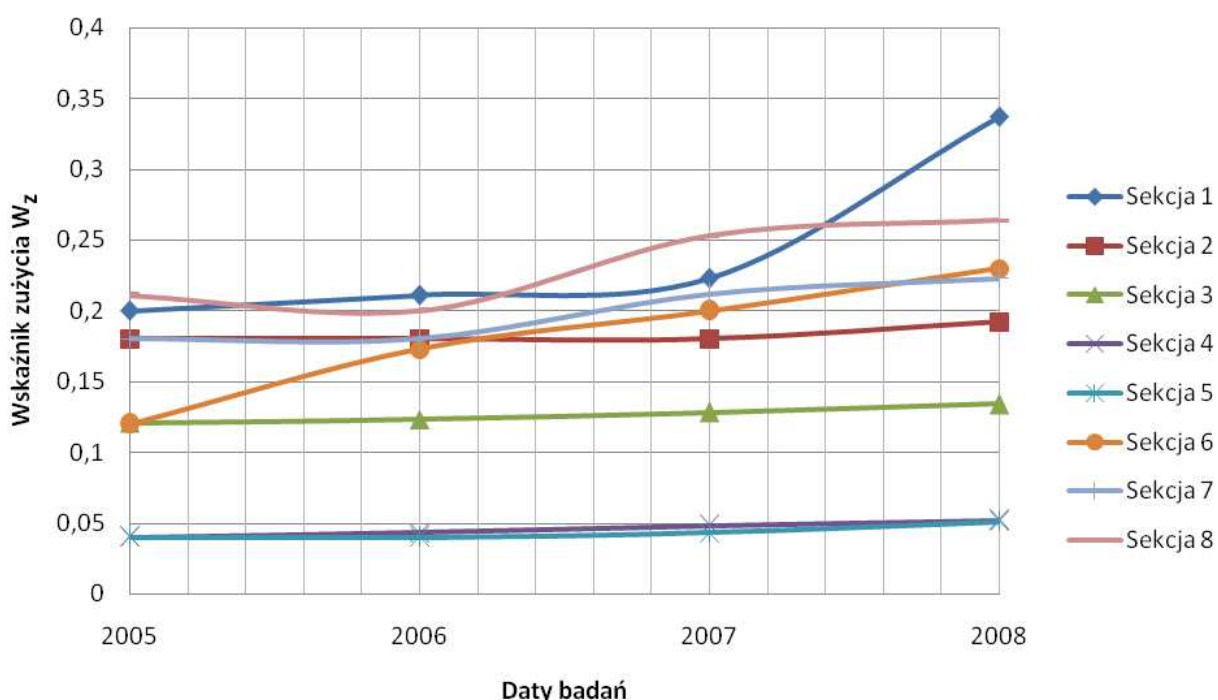
	Liczba uszkodzeń w odcinku 4	W_p	W_k	W_l	k_p	k_k	k_l	W_z
Sekcja 1	6	0,2	0,3	0,5	1	0,02	0,01	0,211
Sekcja 2	1	0,2	0,3	0,5	0,9	0	0	0,18
Sekcja 3	4	0,2	0,3	0,5	0,6	0,01	0	0,123
Sekcja 4	4	0,2	0,3	0,5	0,2	0,01	0	0,043
Sekcja 5	2	0,2	0,3	0,5	0,2	0	0	0,04
Sekcja 6	13	0,2	0,3	0,5	0,6	0,11	0,04	0,173
Sekcja 7	2	0,2	0,3	0,5	0,9	0	0	0,18
Sekcja 8	1	0,2	0,3	0,5	1	0	0	0,2

Tabela 10.4. Wartości współczynników dla odcinka 4 taśmy przenośnika typu Bogda I z badania w 04.2007

	Liczba uszkodzeń w odcinku 4	W_p	W_k	W_l	k_p	k_k	k_l	W_z
Sekcja 1	10	0,2	0,3	0,5	1	0,06	0,01	0,223
Sekcja 2	2	0,2	0,3	0,5	0,9	0	0	0,18
Sekcja 3	4	0,2	0,3	0,5	0,6	0,01	0,01	0,128
Sekcja 4	5	0,2	0,3	0,5	0,2	0,01	0,01	0,048
Sekcja 5	5	0,2	0,3	0,5	0,2	0,01	0	0,043
Sekcja 6	18	0,2	0,3	0,5	0,6	0,2	0,04	0,2
Sekcja 7	12	0,2	0,3	0,5	0,9	0,09	0,01	0,212
Sekcja 8	16	0,2	0,3	0,5	1	0,16	0,01	0,253

Tabela 10.5. Wartości współczynników dla odcinka 4 taśmy przenośnika typu Bogda I z badania w 06.2008

	Liczba uszkodzeń w odcinku 4	W_p	W_k	W_l	k_p	k_k	k_l	W_z
Sekcja 1	25	0,2	0,3	0,5	1	0,39	0,04	0,337
Sekcja 2	8	0,2	0,3	0,5	0,9	0,04	0	0,192
Sekcja 3	7	0,2	0,3	0,5	0,6	0,03	0,01	0,134
Sekcja 4	4	0,2	0,3	0,5	0,2	0,01	0	0,052
Sekcja 5	6	0,2	0,3	0,5	0,2	0,02	0,01	0,051
Sekcja 6	22	0,2	0,3	0,5	0,6	0,3	0,04	0,23
Sekcja 7	3	0,2	0,3	0,5	0,9	0,01	0	0,223
Sekcja 8	7	0,2	0,3	0,5	1	0,03	0,01	0,264



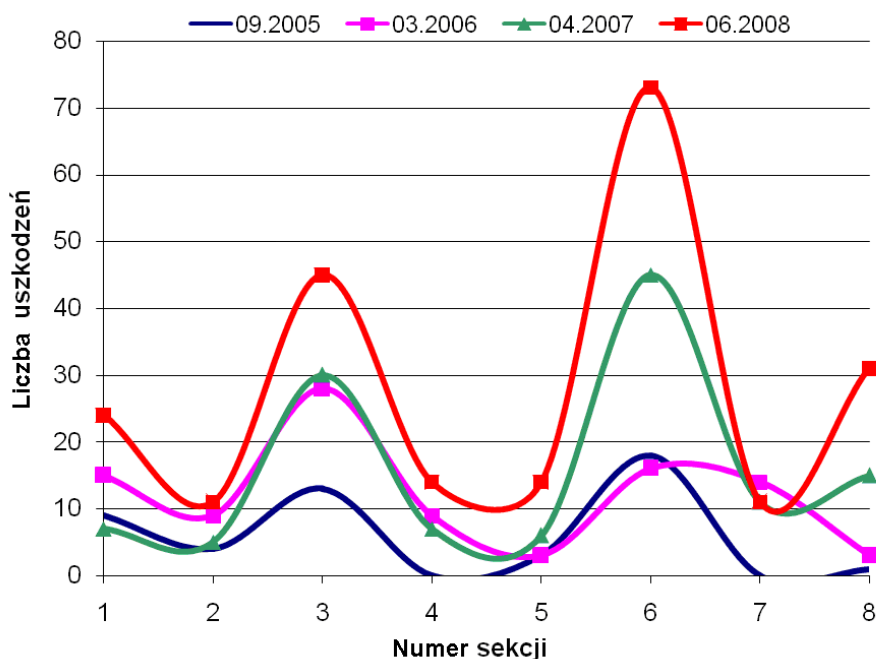
Rys 10.4. Wykres zmienności wskaźnika W_z przez cztery kolejne lata eksploatacji

Na powyższym wykresie (rys. 10.4) zostały przedstawione wartości współczynników zużycia dla poszczególnych sekcji badanej taśmy z lat 2005-2008. Obserwując wykres, można zauważyć tendencję wzrostową współczynnika we wszystkich sekcjach taśmy, co jest ważną informacją diagnostyczną dla użytkownika.

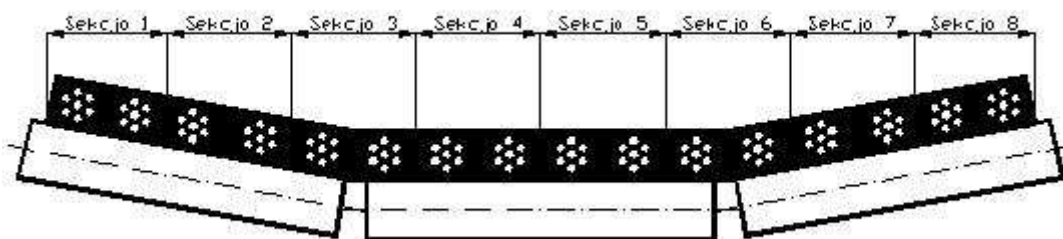
Analizując otrzymane wyniki, zaobserwowano znaczny wzrost liczby uszkodzeń w sekcjach znajdujących się nad miejscami, w których taśma uśłada się w nieckę. Ma to związek ze wzmożonym przeginianiem taśmy w tym miejscu, które odbywa się zarówno

w płaszczyźnie ruchu taśmy, jak i w płaszczyźnie do niej prostopadłej. Można to zaobserwować na wykresie przedstawionym na rysunku 10.5.

Jak wynika z obserwacji wykresu, sekcje z największą liczbą uszkodzeń (3 i 6) przypadają dokładnie w miejscach, w których taśma jest wyginana w nieckę (rys. 10.6). W tych miejscach należy zwrócić szczególną uwagę na zmiany powierzchni gumy taśmy przenośnikowej.



Rys. 10.5. Wykres sumarycznej liczby uszkodzeń dla taśmy przenośnika typu Bogda I



Rys. 10.6. Układ taśmy przenośnikowej na krążnikach

Zastosowanie logiki rozmytej w monitoringu stanu technicznego taśm przenośnikowych z zawulkanizowanymi linkami stalowymi pozwoli w przyszłości na rozbudowę przedstawionego w pracy systemu ekspertowego, co doprowadzi do budowy systemów hybrydowych.

11. Podsumowanie i wnioski

System monitorowania stanu technicznego taśmy z linkami stalowymi jest systemem doradczym, wspomagającym pracę eksperta w zakresie diagnostyki technicznej. Zadaniem temu systemu jest przekazywanie informacji o sytuacjach awaryjnych urządzeniom sterującym napędami przenośnika. System, jak i użytkownik mają możliwość komunikacji i wybrania odpowiedniego rozwiązania. System ekspertowy ma również możliwość działania w sytuacjach, gdy baza wiedzy nie jest kompletna lub jest niepewna.

Badania taśm przenośnikowych stosowaną dotychczas metodą za pomocą głowicy GP9 wymagało każdorazowego wyłączenia przenośnika na około 3–4 godziny w celu zamocowania głowicy wraz z oprzyrządowaniem. Przestoje związane z uzbrojeniem aparatury pomiarowej powodowały straty wynikające z przerwy w ciągłości transportu urobku. Problem ten zostaje wyeliminowany dzięki zastosowaniu nowego systemu diagnostycznego pozwalającego na ciągłą analizę stanu technicznego taśmy, gdyż wyłączenia dokonuje się tylko raz, podczas montowania głowicy pomiarowej.

Podczas badania taśm przy pomocy głowicy GP9 istnieje konieczność przesuwania głowicy w poprzek taśmy. Nieprecyzyjność tego przesuwania powoduje, że głowica w kolejnych badaniach nie zawsze znajduje się dokładnie w tym samym miejscu i nad tymi samymi uszkodzeniami, nad którymi znajdowała się podczas poprzedniego badania. Może to skutkować tym, że niektóre uszkodzenia widoczne podczas jednego badania, nie będą „zauważone” podczas kolejnego badania i liczba uszkodzeń w kolejnym roku eksploatacji może być niższa niż w roku poprzednim.

Zalety opracowanego systemu monitorowania stanu technicznego taśm z linkami stalowymi:

- pracuje w czasie rzeczywistym daje możliwość sterowania napędem przenośnika w sytuacjach zagrożenia, otrzymuje w czasie rzeczywistym olbrzymią ilość danych i dzięki odpowiedniemu oprogramowaniu szybko podejmuje właściwą decyzję,
- prezentuje wyniki badania użytkownikowi (w postaci macierzy uszkodzeń), do którego należy ocena ich jakości. Wyniki te mogą być odrzucone i wtedy system w kolejnym cyklu pomiarowym generuje następne,
- użycie systemu w czasie rzeczywistym umożliwia:

- zmniejszenie potrzeby ciągłej obecności na stanowisku diagnostyków o wysokich kwalifikacjach,
- natychmiastowe wykrycie awarii,
- kompleksową ocenę stanu technicznego taśmy,
- system w czasie rzeczywistym zbiera informacje z czujników co ściśle określony czas wynikający z kolejnego obiegu taśmy, nie pomijając żadnego pomiaru, co nie zawsze realizuje człowiek;
- system może być wyposażony w mechanizmy dedukcyjne. Umożliwiają one przewidywanie przyszłych stanów systemu na podstawie obserwacji (wykorzystanie logiki rozmytej), tworzenie pewnych uogólnień na podstawie zaobserwowanych prawidłowości.

W wyniku realizacji pracy można wysunąć następujące wnioski:

1. Udowodniono pozostawioną na wstępie tezę, że zastosowanie metody ciągłej analizy stanu technicznego w diagnostyce taśm z linkami stalowymi pozwoliło na obserwację symptomów uszkodzeń taśmy i ocenę jej cech stanu.

2. Monitoring taśm z linkami stalowymi z równoczesną obserwacją macierzy uszkodzeń dostarcza wiele cennych informacji diagnostycznych, których wykorzystanie pozwoli na wczesne wykrywanie stanów awaryjnych. Umiejętne wykorzystanie tych informacji prowadzi do podniesienia poziomu bezpieczeństwa eksploatacji taśmy oraz wydłużenie czasu bezpiecznej eksploatacji przenośnika.

3. Analiza macierzy obserwacji z zastosowaniem logiki rozmytej w diagnostyce taśm z linkami stalowymi oraz określenie funkcji przynależności, pozwala na wyznaczenie wskaźników zużycia taśmy. Funkcje przynależności mogą posłużyć do budowy systemu ekspertowego, który niezależnie od człowieka będzie podejmował decyzje w sytuacjach zagrożenia.

4. Rola, jaką transport przenośnikowy odgrywa w przemyśle sprawia, iż prace nad opracowywaniem wskaźników zużycia taśm, jak również nad kryteriami ich wymiany będą nadal prowadzone przez teoretyków i praktyków zagadnień związanych z przenośnikami taśmowymi.

Bibliografia

1. Antoniak J., *Górnictwo przesyłniki taśmowe*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 2006
2. Arnold R.R., *Rascet i projektowanie magnitnych sistem z postojannymi magnistami*, Moskwa 1969
3. Belov K.P., *Zjawiska w materiałach magnetycznych*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1962
4. Błażej R., Zimroz R., Nowak R., Grzyb K., Kurp Ł.: *Rozbudowa funkcjonalności systemu EyeQ do diagnostyki rdzenia taśm typu ST*, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze nr 3(9), Wydawnictwo FMR-Trans Wrocław 2010
5. Elbaum J., *Obwody magnetyczne*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1959
6. Hardygóra M., *Taśmy przesyłnikowe*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 1999
7. Hardygóra M., Pelc W., *Metody wykrywania uszkodzeń w taśmach przesyłnikowych z linkami stalowymi*, Praca naukowa Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Zeszyt 4, Wrocław 1981
8. Harrison A., *Testing steel- cord belt splices with a magnetic conveyor belt monitor*, Journal of Nondestructive Evaluation , Vol.5, No. 1, 1985,
9. Harrison A., *Detecting failure In vulcanised conveyor belt splices*, Bulk Solids Hand. Int. J., Vol. 4, No. 4, pp. 865-868, 1984
10. Harrison A., *New Development In Conveyor Belt Monitoring*, Machinery and Production Engeenering, Vol. 32, p.17, 1979
11. Harrison A., Kasper S., *Steel Cord Betting: Standards, Measurnament and Field Performance*, SME Contess Reno NV Feb. 1 6, charter 16, pp. 165-172, 1993
12. Hellwig Z, *Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej*, Wydawnictwo PWN Warszawa 1971
13. Koczwarą J., *Problemy bezpiecznej eksploatacji przesyłników taśmowych*, Cuprum nr 3(56), Wrocław 2010
14. Kwaśniewski J., *Wpływ parametrów konstrukcyjnych głowic defektografów magnetycznych lin stalowych na ich własności metrologiczne (praca doktorska)*, Kraków 1987
15. Kwaśniewski J., Machula T., *Diagnostyka taśm z linkami stalowymi*, „Transport Przemysłowy” 4/2006, Wrocław 2006
16. Kwaśniewski J., Machula T., *Rozwój metody badania linek stalowych taśm przesyłnikowych*, Archiwum Górnictwa 51/2/2006, Kraków 2006

17. Kwaśniewski J., Molski Sz., Machula T., *System ciągłej rejestracji uszkodzeń linek stalowych przenośników taśmowych* – Materiały XII Międzynarodowego Seminarium Zakopane 2006 – Nowe rozwiązania i doświadczenia w budowie i bezpiecznej eksploatacji urządzeń kompleksowej odstawy urobku przenośnikami taśmowymi, Zakopane 10-12.05.2006,
18. Kwaśniewski J., Machula T., *Monitorowanie stanu technicznego taśm z linkami stalowymi w strefach zagrożonych wybuchem* – Materiały III międzynarodowej konferencji z cyklu „Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie” Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o. o. Ustroń 20-22.11.2007. (materiały prezentowane również na konferencji Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG pt: „Innowacyjne i bezpieczne maszyny i urządzenia dla górnictwa węgla kamiennego” Szczyrk 2007,
19. Kwaśniewski J., Machula T., *Zastosowanie metody magnetycznej do monitorowania stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi* - Materiały XV Międzynarodowej Konferencji *Investigation, production and use of steel ropes, conveyors and hoisting machines*, Podbanskie 2008.
20. Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, Wydawnictwo Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2001.
21. Robakowski S., *Bezpieczna eksploatacja taśm przenośnikowych w zakładach górniczych*, Materiały konferencyjne FTT Stomil Wolbrom S.A. z X Międzynarodowego Sympozjum – Zakopane 2002
22. Tytko A., *Eksploatacja lin stalowych*, Wydawnictw Śląsk, Katowice-Warszawa 2003.
23. Żur T., Hardygóra M., *Przenośniki taśmowe w górnictwie*, Katowice 1996
24. Patent nr 207764 z dnia 16.05.2006 pt: *Sposób eksploatacyjnego monitorowania taśm i lokalizacji uszkodzeń zbrojonej taśmy przenośnika*, Kwaśniewski J., Machula T., Molski Sz.
25. Ocena stanu technicznego taśmy z linkami stalowymi przenośnika taśmowego zabudowanego na upadowej dostawczo-transportowej w KWK Marcel, Nr umowy AGH 5.5.130.074, Kraków marzec 2011

ON LINE:

26. www.apexfenner.com.au

27. www.goodyear.com/productsdetail.aspx?id=12878

28. www.isep.pw.edu.pl/ZakladNapedu/dyplomy/fuzzy/podstawy_FL.htm
29. www.tepgroup.com/images/Adobe/PDF/Contitech/ContiTech_Brochure.PDF
30. www.intron.ru
31. www.mining-technology.com/contractors/materials/contitech/
32. www.indiamart.com/company/2328019/products.html
33. www.phoenix-conveyorbelts.com
34. www.pixii.com/mdr.htm
35. www.rema.com/pubs/splicesteel.pdf
36. www.z-ndt.com/md120-10.jpg
37. www.flexco.com/
38. www.sdms.co.uk/product.php?pid=538
39. www.cmosxray.com
40. www.mining-technology.com/.../phoenix4.jpg
41. www.ampero.pl