

PROPOZYCJA METODY PRZETWARZANIA WIELOWYMIAROWEGO SYGNAŁU NDT NA POTRZEBY OCENY STANU TECHNICZNEGO TAŚMY Z LINKAMI STALOWYMI

PROPOSAL FOR A MULTI-DIMENSIONAL SIGNAL PROCESSING METHODS FOR THE ASSESSMENT OF NDT TECHNICAL CONDITION OF THE STEEL CORD BELT

Ryszard Błażej, Leszek Jurdziak - Instytut Górnicztwa, Politechnika Wrocławska
Monika Hardygóra, Radosław Zimroz - Instytut Górnicztwa, Politechnika Wrocławska;
KGHM CUPRUM sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław

W artykule omówiono propozycję metody przetwarzania wielowymiarowego sygnału NDT na potrzeby oceny stanu technicznego taśmy z linkami stalowymi. Zaproponowano metodę segmentacji danych na różnych etapach ich przetwarzania (określanie rozmiaru pętli, wykrywanie obszarów taśmy ze złączami, segmentację danych dla poszczególnych odcinków), procedurę detekcji uszkodzenia i wizualizacji wyników w przestrzeni dwuwymiarowej i jednowymiarowej. Działanie procedury diagnostycznej poddano walidacji na danych rzeczywistych z kilku różnych przenośników. W końcowej części pracy zaproponowano interpretację wyników dla badanych przenośników.

Słowa kluczowe: taśma przenośnikowa, diagnostyka, uszkodzenia linek stalowych, badania magnetyczne

In the paper a proposal for a multi-dimensional signal processing methods for the assessment of NDT technical condition of the steel cord belt is presented. Signal segmentation method at different stages of data processing (belt loop size, joints detection, segmentation of data for each section, i.e. between joints) is proposed. Next, the procedure for damage detection and damage: location and size visualization in one- and two-dimensional space is described. The diagnostic procedure was validated on real data acquired in from several belt conveyors in open cast lignite mine. In the final part of the paper the interpretation of test results for conveyors is discussed.

Key words: conveyor belt, condition monitoring, steel cords damage, magnetic testing

Wprowadzenie

Transport kopalniany w polskich przedsiębiorstwach górniczych związanych z węglem brunatnym czy rudami metali oparty jest na przenośnikach taśmowych. W zależności od przeznaczenia, lokalizacji itd., długość pojedynczego przenośnika może się wahać od kilkudziesięciu metrów (na przykład na maszynach podstawowych w kopalni odkrywkowej) do kilku kilometrów. W rozwiązaniach stosowanych za granicami Polski znane są przypadki przenośników o długości rzędu 20 km [16].

System transportowy w kopalni (węgla brunatnego lub miedzi) obejmuje rozległy teren. Biorąc pod uwagę różnorodność poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych, zmienność obciążeń i specyfikę pracy przenośnika a także stosunkowo duże narażenie na niekorzystne oddziaływanie agresywnego środowiska kopalnianego można jednoznacznie stwierdzić, że utrzymanie systemu transportowego w kopalni stwarza liczne problemy i stanowi wyzwanie z technicznego, organizacyjnego i ekonomicznego punktu widzenia [1,4].

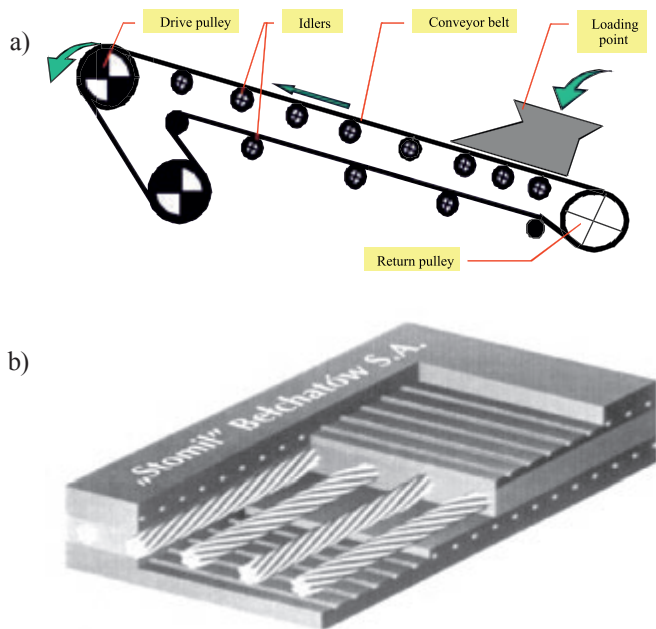
W Zakładzie Systemów Maszynowych Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej od wielu lat prowadzone są badania dotyczące szeregu aspektów związanych z transpor-

tem przenośnikowym dotyczących np.: nowych rozwiązań konstrukcyjnych, zastosowania niszczących i nieniszczących testów elementów przenośnika taśmowego w skali laboratoryjnej, symulacji działania systemu transportowego, szeroko rozumianej polityki zarządzania eksploatacją z wykorzystaniem metod diagnostyki drganiowej, badań nieniszczących itd. [1-3, 5-7, 14-15]. Warto odnotować kilka prac z innych ośrodków opublikowanych w ostatnich latach [8-10], w których dyskutowana jest tematyka badań dotyczących taśmy przenośnikowych z wykorzystaniem innych metod NDT.

W artykule przedstawiona zostanie propozycja jednej z opracowanych metod oceny stanu technicznego taśmy przenośnikowej z rdzeniem z linkami stalowymi. Głównym elementem omawianej procedury jest metodyka akwizycji i przetwarzania wielokanałowego strumienia danych opisujących zmiany pola magnetycznego pochodzącego od linek stalowych (wielowymiarowego sygnału NDT, ang. *Non-Destructive Testing*). Sygnały te zostały zarejestrowane w warunkach kopalni odkrywkowej na kilku przenośnikach o różnych parametrach konstrukcyjnych i różnym stanie taśmy. Badania prowadzono także w skali laboratoryjnej na testowym przenośniku z zadanymi w sposób sztuczny uszkodzeniami taśmy.

Przeñośnik taśmowy i taśma przeñośnikowa z linkami stalowymi – opis budowy

Analizując budowę przeñośnika wyróżnić można kilka kluczowych elementów: układ napędowy, taśma przeñośnikowa, krążniki, układ napinania taśmy, punkt załadowczy, urządzenia czyszczące, itd. (rys. 1) Problem oceny bieżącego stanu technicznego wymienionych elementów był wielokrotnie podejmowany przez różnych autorów. W tej pracy rozważany będzie temat diagnostyki taśmy z linkami, a dokładniej metody wykrywania uszkodzeń rdzenia taśmy metodami magnetycznymi. Budowę taśmy z rdzeniem z linek stalowych pokazano na rysunku 1b



Rys.1 a) Uproszczony schemat przeñośnika taśmowego, b) wewnętrzna struktura rdzenia taśmy

Fig.1 a) Simplified diagram of a belt conveyor, b) Internal structure of a steel cord belt

Koncepcja badań magnetycznych taśmy z linkami

Idea zastosowania badań magnetycznych do oceny stanu technicznego taśmy z linkami stalowymi jest znana od lat [11, 12]. Można odnotować duże podobieństwo metod badań lin [13] stalowych w urządzeniach wyciągowych do badań taśmy z linkami, aczkolwiek skala i specyfika problemu jest jednak inna. Wiąże się ona z ograniczeniami technicznymi (inne rozwiązanie konstrukcyjne czujników, nieporównywalne długości taśmy do długości lin, system do badania taśmy musi być wielokanałowy aby zapewnić odpowiednią rozdzielczość itd.)

Procedura badawcza w ogólności jest prosta. Zmiana stanu technicznego rdzenia jest związana ze zmianą przekroju rdzenia lub pojedynczej linki (przecięcie, korozja, brak linki...). Pole magnetyczne własne rdzenia/linki jest zbyt małe aby można wykonać pomiar, zatem rdzeń taśmy musi zostać wstępnie namagnesowany przy użyciu magnesu trwałego. Po przygotowaniu taśmy, należy wykonać pomiar rozkładu pola magnetycznego taśmy z linkami stalowymi względem jej długości i szerokości. W praktyce, zarówno listwa magnesująca jak i zawierająca matrycę czujników obejmuje całą szerokość taśmy. Pozostaje zatem zbadać rozkład pola magnetycznego względem jej długości. Pomiary wykonywane są na przeñośniku, zatem

praktyczna realizacja pomiaru wymaga zamocowania listwy pomiarowej (najlepiej blisko bębna, tak aby taśma nie była ułożona w nieckę) i uruchomienia przeñośnika, co spowoduje ruch taśmy względem czujników. Procedura zbierania danych wymaga ustalenia punktu odniesienia (punkt startowy) w pętli. Zwykle, zwłaszcza w przypadku długich przeñośników, pętla taśmy składa się z kilku-kilkunastu odcinków o tych samych lub różnych długościach, połączonych ze sobą za pomocą różnych technik. Lokalne zagęszczenie linek zakładkowych na potrzeby wykonania połączenia zaburza naturalny rozkład pola magnetycznego i jest oczywiste, że nie musi to wiązać się z uszkodzeniem linek. Znajomość budowy taśmy jest kluczowa do prawidłowej interpretacji wyników pomiarowych. Procedura zbierania danych powinna zostać zakończona po rejestracji sygnałów z pętli (od markera do markera). Możliwe jest również zebranie kilku cykli (kilkukrotny pomiar tej samej pętli taśmy), co może wpłynąć na poprawę wiarygodności wyników po ich uśrednieniu. Dla zapewnienia odpowiedniej precyzji diagnostycznej, a co za tym idzie rozdzielczości pomiarowej systemu, wykorzystywana w pomiarach listwa pomiarowa zawiera 24 kanały, pojedynczy kanał obejmuje ok. 10 cm szerokości taśmy. Na dokładność pomiaru wpływa także częstotliwość zbierania kolejnych próbek. Przy prędkości taśmy 5-7 m/s wystąpienie dwóch uszkodzeń obok siebie może nie zostać wykryte poprawnie. Częstotliwość próbkowania w praktyce jest ograniczona z góry możliwościami systemów pomiarowych i analizujących. Należy odnotować, że dla 24 kanałów, kilku kilometrów taśmy i nieprawidłowo dobranej (zbyt dużej) częstotliwości próbkowania mogą pojawić się problemy z objętością plików sygnałowych.

Procedura pozyskiwania i przetwarzania danych (sygnałów)

W proponowanym podejściu można wyróżnić kilka kluczowych kroków, które zostaną zilustrowane przykładami. Należy podkreślić olbrzymie znaczenie poprawności wykonania eksperymentu. Istnieje wiele czynników, które mogą mieć wpływ na uzyskane sygnały i w pewnych przypadkach dalsze przetwarzanie nie może być skuteczne (procedura nie jest odporna na wystąpienie takich czynników). Montaż układu magnesowania wstępnego, instalacja markerów magnetycznych i głowicy magnetycznej (matrycy czujników) powinny być wykonywane precyzyjnie i zgodnie z procedurą opisaną w następnej sekcji. Na tym etapie zakłada się, że sygnały są pozyskane poprawnie, to znaczy każdy z sygnałów z 24-kanałowej głowicy magnetycznej nie jest przesterowany, co najmniej jeden z czterech skrajnych kanałów zawiera minimum dwa wzorce związane ze znacznikiem magnetycznym (co oznacza pomiar co najmniej jednej pełnej pętli taśmy).

Procedura przetwarzania sygnałów realizuje trzy główne zadania:

- A) Zarejestrowany sygnał powinien zawierać co najmniej jeden pełny cykl. Po zakończeniu akwizycji sygnał będzie poddany segmentacji wg znacznika magnetycznego zainstalowanego na taśmie. Wykrywanie znacznika pozwala wyodrębnić część sygnału związaną z jednym pełnym cyklem. W przypadku docelowej aplikacji przewiduje się możliwość wprowadzenia do systemu programowo „sztucznego” markera, który

na podstawie znajomości prędkości biegu taśmy i jej teoretycznej długości umożliwia segmentację pełnego cyklu.

- B) Sygnały zarejestrowane przez system zawierają dwa charakterystyczne wzorce: związane z markerem magnetycznym oraz ze zmiennością pola magnetycznego związaną z linkami stalowymi znajdującymi się wewnątrz taśmy. Ze względu na połączenia występujące w pętli taśmy zaburzenia w sygnale mogą być związane ze zmianą stanu technicznego linek ale również z faktu występowania połączeń. Konieczne jest zatem odróżnienie tych zmian pola magnetycznego i wykorzystanie do dalszej analizy tylko zaburzeń (zmian) pola magnetycznego związanych z uszkodzeniami. Warte podkreślenia jest w tym miejscu wiedza dotycząca budowy połączeń. W zależności od sposobu wykonania połączenia (liczby stopni) charakter zmian pola magnetycznego związany z połączeniami będzie wyraźnie się różnić. Zaproponowano procedurę segmentacji fragmentów sygnału związanych z występowaniem połączeń. Sygnały z połączeń są identyfikowane, a w kolejnym kroku wartości sygnałów w tych segmentach są „zerowane”, tak aby końcowej analizie poddać tylko fragmenty sygnałów związane z odcinkami taśmy bez połączeń.
- C) W warunkach rzeczywistych liczba, wielkość i lokalizacja uszkodzeń nie są znane. Dzięki analizie zmian pola magnetycznego można je zidentyfikować. Wyniki końcowe analizy stanu rdzenia taśmy zawierające takie informacje umożliwią służbom utrzymania ruchu podjęcie prawidłowych decyzji o wymianach i naprawach taśmy. Proponuje się wykorzystanie prostych analiz statystycznych i dwuwymiarowej wizualizacji danych wynikowych jako narzędzia wspierającego podejmowanie decyzji.

Uwzględniając powyższe założenia, można procedurę przetwarzania danych opisać w kolejnych krokach:

- Krok 1: Identyfikacja umownego początku pętli taśmy (jeden pełny cykl obrotu pętli taśmy).
- Krok 2: Identyfikacja połączeń taśmy.
- Krok 3: Segmentacja sygnału (usuwanie połączeń).
- Krok 4: Wykrywanie uszkodzeń.
- Krok 5: Analiza statystyczna.

Jednym z kluczowych elementów procedury jest automatyczna identyfikacja pętli taśmy, która wiąże się ze sterowaniem (rozpoczęciem i zakończeniem) procesu akwizycji a także dalszego przetwarzania. Zaproponowany algorytm bazuje na wykrywaniu zainstalowanego przed pomiarem markera magnetycznego na obrzeżu taśmy.

Znacznik magnetyczny indukuje impuls w trakcie przejścia pod głowicą magnetyczną. Aby zapewnić właściwą identyfikację zaproponowano instalację trzech markerów w stałej odległości. Oprócz automatyzacji procedury, zwłaszcza na etapie testowania skuteczności systemu, możliwa jest też wizualna inspekcja poprawności detekcji markera na podstawie zarejestrowanych sygnałów. Zamontowane markery tworzą charakterystyczny wzór, który powinien zostać zidentyfikowany przez operatora programu i zatwierdzony.

W celu zapewnienia dużej skuteczności wykrywania markerów, utrudnionej ze względu na fluktuacje położenia taśmy względem listwy pomiarowej oraz możliwość generowania „fałszywych” impulsów poprzez zniszczone obrzeża, czy zakłócenia pochodzące z sąsiednich kanałów, procedura

detekcji korzysta z normalizacji sygnałów ze skrajnych kanałów i wykorzystuje informacje z kilku kanałów jednocześnie, by wyeliminować zakłócenia i poprawić stosunek sygnału do szumu (ang. SNR - Signal To Noise Ratio).

W celu identyfikacji „początku” pętli, tj. wyboru jednego z trzech wskaźników wykorzystano prosty pomiar odległości między sąsiednimi impulsami. Jeśli przekracza ona podane wartości progowe i odpowiada rzeczywistej odległości zamontowanych znaczników, to można uznać, że zidentyfikowano ich ślad pośród innych sygnałów. Inne kluczowe elementy procedury segmentacji dotyczą separacji połączeń i uszkodzeń. Tutaj ponownie wykorzystano możliwość informacji agregacji danych z sygnału wielokanałowego. Wiadomo, że połączenie musi wygenerować zmianę pola we wszystkich kanałach. W praktyce, uszkodzenie rdzenia w takiej skali nie występuje i nie ma regularnego kształtu. Kształt zaburzenia sygnałów związanych z uszkodzeniami jest bowiem zupełnie inny niż w przypadku połączeń.

Poprzez agregację informacji z kanałów uzyskuje się „wzmocnienie” zaburzenia pochodzącego od regularnego połączenia i „osłabienie” (wynikające z uśrednienia) zaburzenia związanego z losowymi uszkodzeniami, co czyni metodę segmentacji bardziej odporną na zakłócenia.

Wyodrębnienie segmentów zawierających tylko połączenia oraz segmentów dotyczących poszczególnych odcinków taśmy tworzących pętle umożliwia dalsze przetwarzanie zorientowane na detekcję uszkodzeń w odcinkach taśmy lub analizę stanu samych połączeń. W tej pracy ograniczono się tylko do detekcji uszkodzeń.

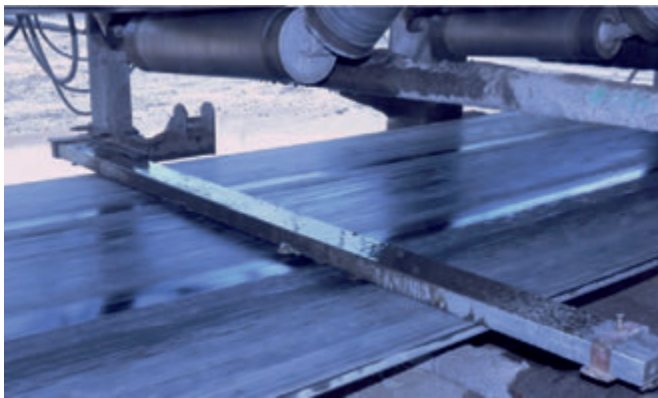
Wykrywanie uszkodzenia odbywa się na bazie sygnału z pojedynczego kanału przy wykorzystaniu znanych metod określanych mianem „peak detection”. Wykrycie zaburzenia wiąże się z zapisem jego lokalizacji i amplitudy do tablicy danych wynikowych o wymiarach odpowiadających liczbie kanałów i długości taśmy. Dalsze analizy (wizualizacja, statystyki, wyznaczanie miar ryzyka itd.) wykonuje się już z wykorzystaniem szybkich procedur wykorzystujących operacje wektorowe i macierzowe zaimplementowane w środowisku Matlab.

Eksperymenty

Wstępne badania dotyczące walidacji działania algorytmów, zwłaszcza dotyczących samej akwizycji danych, realizowane były na stanowisku badawczym, które stanowi kilkumetrowy przenośnik ze sztucznie wprowadzonymi uszkodzeniami linek w pętli taśmy. Uszkodzenia te miały różną intensywność, a testy były przeprowadzane przy różnych prędkościach taśmy [14].

Jest oczywiste, że pomiary stanowiskowe nie mogą zastąpić badań w kopalni. Pomiary kontrolne w kopalni zapewniają weryfikację funkcji systemu, poprawności i efektywności poszczególnych elementów, w tym:

- poprawny przebieg akwizycji sygnałów ze wszystkich 24 kanałów,
- identyfikację pętli taśmy na podstawie sygnałów zarejestrowanych głowicą magnetyczną i zamontowanego znacznika magnetycznego,
- zbieranie danych przez moduł i szybki podgląd zapisanych danych,
- pomiary innych parametrów, takich jak położenie głowicy pomiarowej, a odległość od badanej taśmy, położenie magnesu trwałego względem głowicy magnetycznej, czynników atmosferycznych i środowiskowych itd. (rys. 2).



Rys. 2. System pomiarowy w praktycznym działaniu (magnes trwały, listwa pomiarowa, jednostka centralna, notebook z oprogramowaniem w wersji podstawowej)

Fig. 2. Belt's steel cord condition monitoring system in action (magnet, sensors array, central unit and notebook with basic software)

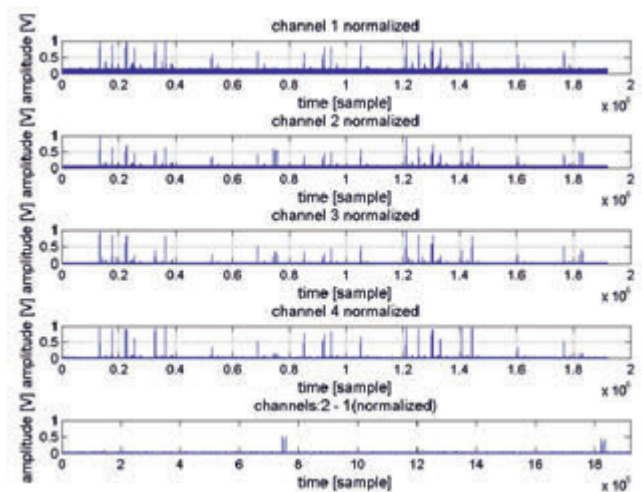
Wyniki analiz

W tej części pracy przedstawione zostaną wyniki pomiarów oraz wynik przetwarzania „surowych” danych po kolejnych etapach działania procedury. Na rysunku 3 przedstawiono sygnały z kanałów 1-4 po normalizacji oraz sygnał różnicowy (kanał 3 - kanał 1) z widocznymi indykatorami lokalizacji markera magnetycznego (dolny sub-plot, ok. $T=7.5 \times 10^5$ oraz $T=18 \times 10^5$). Warto odnotować znaczącą poprawę SNR dla sygnału różnicowego w porównaniu do oryginalnych kanałów.

Po zlokalizowaniu trzech impulsów pochodzących od markerów możliwy jest podział sygnału na segmenty odpowiadające pętlicy, a następnie wyodrębnienie/rozróżnienie sygnałów odpowiadających połączeniom i jednolitym odcinkom taśmy (rys. 4, 5 i 6). Dla sygnałów zawierających tylko dane związane z odcinkami taśmy (bez połączeń) możliwe jest zastosowanie znanej procedury detekcji impulsu w przesuwającym się wzdłuż sygnału „oknie” o określonej długości. Wizualizację wyników detekcji pokazano dla kilku przykładowych kanałów na rys. 7.

Rysunki 8-10 przedstawiają wyniki końcowe analiz, które mogą być podstawą do podjęcia decyzji o naprawie (regeneracji taśmy), jej wymianie czy dopuszczeniu do dalszej eksploatacji. Rysunek 8 przedstawia przestrzenny rozkład uszkodzeń wykrytych przez system diagnostyczny dla całej taśmy. Na podstawie rysunku 8 można szybko uzyskać analogiczny wynik dla dowolnego odcinka taśmy (od połączenia do połączenia), co ma duże znaczenie ze względu na to, że naprawy dotyczą zwykle wymiany fragmentów taśmy a nie całości.

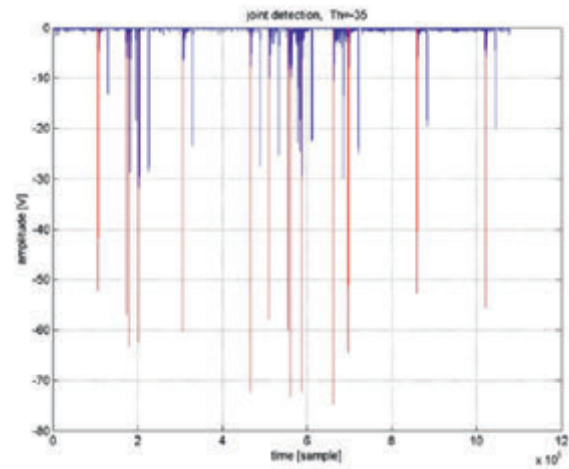
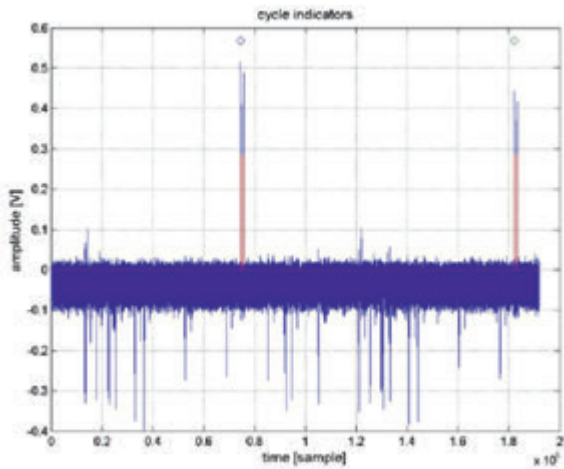
Rysunki 9 i 10 przedstawiają dane wynikowe z mapy trójwymiarowej zagregowanej formie.



Rys. 3 Sygnały z kanałów 1-4 po normalizacji oraz sygnał różnicowy (kanał 3 - kanał 1) z widocznymi indykatorami lokalizacji markera magnetycznego

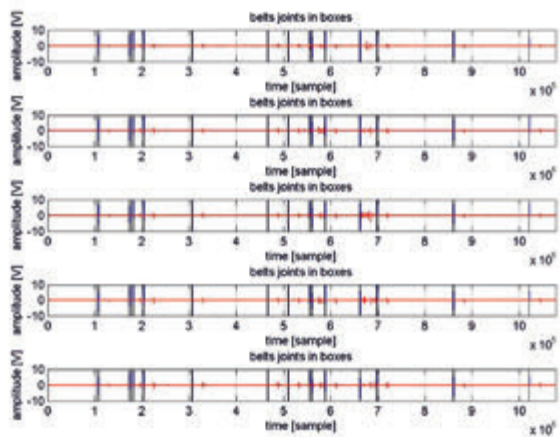
Fig. 3. Normalized absolute values of signals for channels 1-4 and difference between channels 3 and 1 (with clearly seen indicators of magnetic markers related to belt loop)

Rysunek 9 opisuje rozkład liczby uszkodzeń względem szerokości taśmy, zaś rysunek 10 - rozkład amplitudy zaburzeń (rozmiaru uszkodzenia) względem szerokości taśmy. Należy odnotować różne znaczenie tych informacji. Może się bowiem okazać, że liczba uszkodzeń jest niewielka, ale ich wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji jest duży ze względu na rozmiar uszkodzenia. Warto również zauważyć koncentrację zarówno liczby jak i wielkości uszkodzeń na środku taśmy oraz na jej obrzeżach. W pierwszym przypadku jest to związane z uderze-



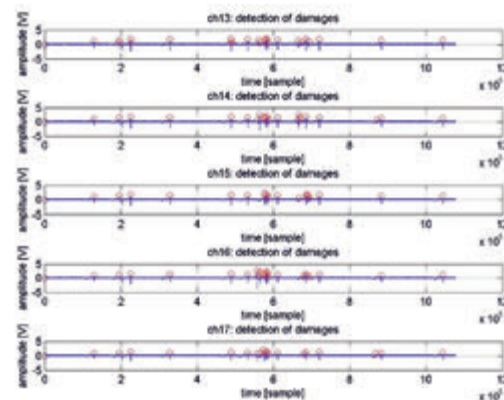
Rys. 4. Wyniki segmentacji sygnału; określenie rozmiaru segmentu (związanego z pętlą) używanego do dalszej analizy, wykrywanie połączeń w pętli taśm na podstawie sumy ujemnych wartości sygnału dla wszystkich kanałów

Fig. 4. Results of signal segmentation procedure: left - establishing segment size (belt loop) for further analysis and right - joint detection procedure - sum of negative values of signals for all channels



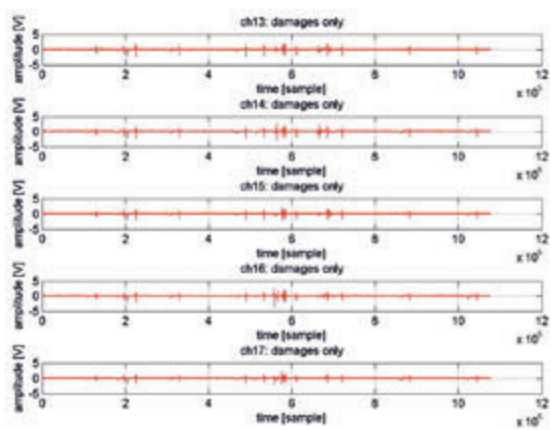
Rys. 5 Wynik procedury wykrywania połączeń – wykryte połączenia oznaczone prostokątami – przykładowy wynik dla pierwszych pięciu kanałów

Fig. 5. Results of joint detection procedure - detected belt joints – result for first five channels



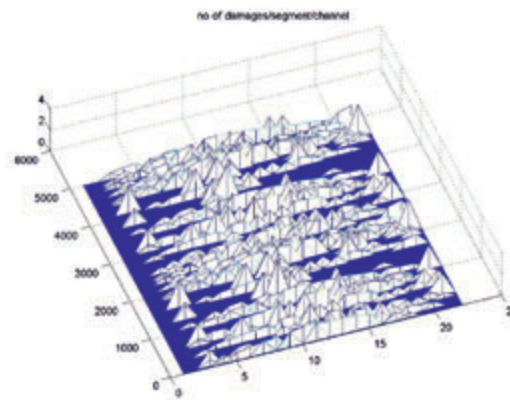
Rys. 7 Wynik procedury detekcji impulsów w sygnale (po eliminacji połączeń)

Fig. 7. Results of peak detection procedure for NDT signal (after joints related segments removal)



Rys. 6. Sygnały po segmentacji – przykład danych dla pierwszych 12 kanałów z „wyliminowanymi” połączeniami

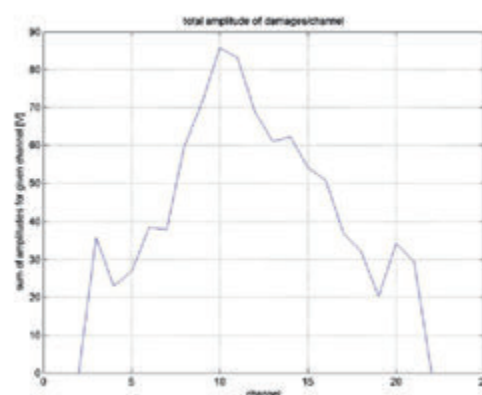
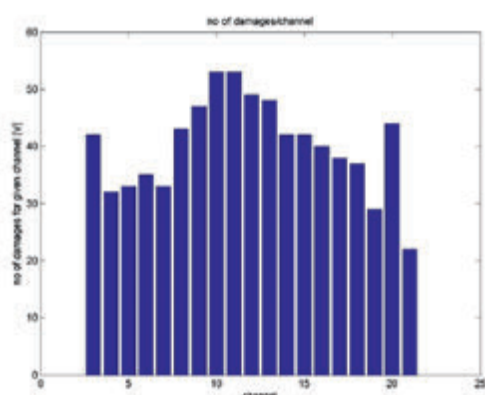
Fig. 6. Segmented signals – first 12 channels (after joints related segment removal)



Rys. 8. Wizualizacja wyników – przestrzenny rozkład uszkodzeń wykrytych przez system diagnostyczny dla całej taśmy

Fig. 8. Spatial distribution of detected damages for whole belt

niami ostrych brył spadających na taśmę w punkcie załadunku urobku. Drugi przypadek jest bardziej skomplikowany, gdyż lokalizacja przyczyny powstania uszkodzenia jest niezwykle trudna, co więcej, uszkodzone obrzeża mogą ulec dalszemu szybkiemu zniszczeniu w dowolnym miejscu przenośnika (w przypadku zahaczenia wystającej z obrzeży linki o elementy stacjonarne przenośnika może dojść do rozerwania taśmy).



Rys. 9. Agregacja danych wyników z mapy trójwymiarowej: rozkład liczby uszkodzeń względem szerokości taśmy, rozkład amplitudy zaburzeń (rozmiaru uszkodzenia) względem szerokości taśmy

Fig. 9. Aggregation of results from 3D map: Histogram of number of damages with respect to channel number (along belt width), histogram of amplitudes of disturbances (damage size) with respect to channel number

Wnioski

W artykule omówiono procedurę przetwarzania wielokanałowego sygnału NDT i przedstawiono przykładowe wyniki działania tej procedury dla danych rzeczywistych zarejestrowanych w czasie normalnej eksploatacji przenośnika taśmowego. Celem prowadzonych badań jest opracowanie przenośnego systemu diagnostycznego dla taśm z linkami stalowymi, który w sposób zautomatyzowany i wiarygodny dostarczy informacje o stanie taśmy. Na obecnym etapie projektu, metody analizy danych są wykonywane „off-line”, jako forma post-proces-

singu danych eksperymentalnych. Równolegle, zaproponowane algorytmy są implementowane w przenośnym systemie diagnostycznym, który praktycznie w kilkadziesiąt sekund po zakończeniu pomiaru umożliwi otrzymanie wstępnej diagnozy stanu taśmy. Koncepcja systemu zakłada istnienie dwóch wariantów oprogramowania. Przenośna wersja oprogramowania zawiera podstawowe analityczne funkcjonalności systemu, służy głównie do sterowania procesem akwizycji i wstępnej diagnozy. Wersja rozszerzona zainstalowana na komputerze stacjonarnym umożliwia zaawansowane przetwarzanie danych, wizualizację wyników i zawiera procedury raportowania.

Literatura

- [1] Bartelmus W. *Diagnostyka Maszyn Górniczych* Górnictwo Odkrywkowe Wyd. Śląsk Katowice 1998
- [2] R. Zimroz, W. Bartelmus, *Application of adaptive filtering for weak impulsive signal recovery for bearings local damage detection in complex mining mechanical systems working under condition of varying load*, Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena 180 (2012) 250-257
- [3] L. Gładysiewicz, R. Król, J. Bukowski: *Eksperymentalne badania oporów ruchu przenośnika taśmowego* [Tests of belt conveyor resistance to motion], Maintenance and Reliability 51/3 (2011) 17-25
- [4] P. Kulinowski, *Simulation studies as the part of an integrated design process dealing with belt conveyor operation*, Maintenance and Reliability 15/1 (2013) 83-88
- [5] R. Błażej, R. Makowski, R. Zimroz *A method of damage detecting in conveyor belts with steel cords*. The Polish patent application - No P 393527, 31.12.2010
- [6] R. Błażej, L. Jurdziak: *Integrated diagnostic device for automatic assessment of conveyor belts condition*. Proceedings of 22nd World Mining Congress & Expo, 11-16 September, Istanbul-(2011). Vol. 3 / ed. Şinasi Eskikaya. Ankara, pp 675-680
- [7] R. Zimroz, R. Makowski R. Błażej: *A method of damage detection in conveyor belts with steel cords by NDT signal processing*. Proceedings of The Eighth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM2011/MFPT2011 Cardiff, Wales, (20-22 June 2011), Coxmoor Publishing Company
- [8] D. Mazurkiewicz, *Problems of numerical simulation of stress and strain in the area of the adhesive-bonded joint of a conveyor belt*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 9/2 (2009) 75-91
- [9] Q.-L. Zeng, J.-G. Wang, L. Wang, C.-L. Wang, *The research of coal mine conveyor belt tearing based on digital image processing*, Advances in Intelligent Systems and Computing 181 AISC (2012) 187-191
- [10] G. Fedorko, V. Molnár, J. Živčák, M. Dovica, N. Husáková: *Failure analysis of textile rubber conveyor belt damaged by dynamic wear*. Engineering Failure Analysis 28 (2013) 103-114
- [11] A. Harrison, *15 Years of Conveyor Belt Nondestructive Evaluation*, Bulk Solids Handling 16/1 (1996).
- [12] D Blum, *Scanning steel cord conveyor belts with the "Belt C.A.T." MDR system*. Journal of Bulk Solids Handling 16/3 (1996) 437.
- [13] J Kwaśniewski *Badania magnetyczne lin stalowych o klasycznej konstrukcji oraz lin o powierzchniowym styku drutów* (kompaktowanych) [Magnetic testing of standard and surface contact (compact) wire ropes] Nieniszczące badania materiałów : XIX seminarium : Zakopane, 12–15 marca 2013 r S. 5–13
- [14] R. Błażej, M. Hardygóra, L. Jurdziak: *Wykorzystanie systemu diagnostycznego do oceny stanu taśm i połączeń w fazie ich użytkowania i produkcji*. Sympozjum naukowo-techniczne, Zakopane, 24-26 stycznia 2013, s. 39-48
- [15] R. Błażej, L. Jurdziak, R. Zimroz, M. Hardygóra, W. Kawalec: *Inteligentny system do automatycznego badania i ciągłej diagnozy stanu taśm przenośnikowych - cele i założenia projektu* Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze. 2012, nr 4, s. 10-16
- [16] W. Kawalec: *Przenośniki taśmowe dalekiego zasięgu do transportu węgla brunatnego*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze. 2009, nr 1, s. 6-13