

BADANIE WRAŻLIWOŚCI SYSTEMU DIAGBELT+ NA ZMIANĘ PARAMETRÓW POMIARU

SENSITIVITY ANALYSIS OF THE DIAGBELT+ SYSTEM TO CHANGES IN MEASUREMENT PARAMETERS

Konrad Ciesielski, Ryszard Błażej - Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska

DOI:10.5604/01.3001.0055.5140

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dotyczących wpływu trzech kluczowych parametrów pomiarowych systemu DiagBelt+ – odległości głowicy od taśmy, prędkości przenośnika oraz progu czułości – na jakość sygnałów diagnostycznych rejestrowanych w czasie detekcji uszkodzeń taśm przenośnikowych z rdzeniem stalowym. Analiza przeprowadzona została na stanowisku laboratoryjnym, z wykorzystaniem specjalnie przygotowanej taśmy testowej zawierającej modelowe uszkodzenia. Wyniki wykazały istotny wpływ parametrów pomiarowych na rozdzielczość i czytelność sygnału, a optymalne ustawienia głowicy, prędkości oraz progu czułości zostały zidentyfikowane. Dodatkowo przedstawiono analizę korelacji Pearsona pomiędzy zmiennymi pomiarowymi a parametrami sygnału, wskazując na istotne związki wpływające na skuteczność diagnostyczną systemu.

Słowa kluczowe: badania NDT, DiagBelt+, wpływ parametrów na sygnał, metoda magnetyczna

Abstract

The article presents the results of laboratory tests concerning the influence of three key measurement parameters of the DiagBelt+ system – the distance of the head from the belt, the conveyor speed, and the sensitivity threshold – on the quality of diagnostic signals recorded during the detection of damage to steel-cord conveyor belts. The analysis was conducted on a laboratory test stand using a specially prepared test belt containing model damage. The results showed a significant impact of the measurement parameters on the resolution and clarity of the signal, and the optimal settings of the head, speed, and sensitivity threshold were identified. Additionally, a Pearson correlation analysis between the measurement variables and signal parameters was presented, indicating significant relationships affecting the diagnostic effectiveness of the system.

Keywords: NDT testing, DiagBelt+, influence of parameters on the signal, magnetic method

Wprowadzenie

Przenośniki taśmowe stanowią fundament systemów transportu materiałów w wielu gałęziach przemysłu. Ich popularność wynika przede wszystkim z prostoty konstrukcji, niezawodności oraz niskich kosztów eksploatacji. Umożliwiają one sprawny i ciągły transport różnego rodzaju surowców, także na znaczne odległości [1]. Dzięki swojej charakterystyce i możliwości pracy w trybie ciągłym, stanowią niezastąpiony element infrastruktury transportowej wszędzie tam, gdzie kluczowe są wydajność i ekonomia procesu.

Niezawodność działania przenośników taśmowych bezpośrednio skorelowana jest z ciągłością transportu materiału, a tym samym – utrzymanie stanu pracy przez jak najdłuższy czas (minimalizacja ryzyka awarii) wpływa na minimalizację kosztów eksploatacyjnych. Taśmy przenośnikowe dobierane są w zależności od wymagań stawianych w transporcie – najczęściej stosowany podział taśm uwzględnia konstrukcję ich rdzenia dzieląc taśmy na z rdzeniem z linkami stalowymi (1(a)) oraz z rdzeniem tekstylnym (1(b)).



Rys. 1. Schemat taśmy przenośnikowej (a) z rdzeniem tkaninowym (b) z rdzeniem z linkami stalowymi
Fig. 1. Diagram of a conveyor belt (a) with a textile core (b) with a steel cord core

W praktyce, w kopalniach, dla uzyskania większych wydajności i większych kątów niecki, stosuje się taśmy z rdzeniem z linkami stalowymi, które charakteryzują się mniejszą sztywnością poprzeczną, a tym samym – lepszym układaniem się w nieckę.

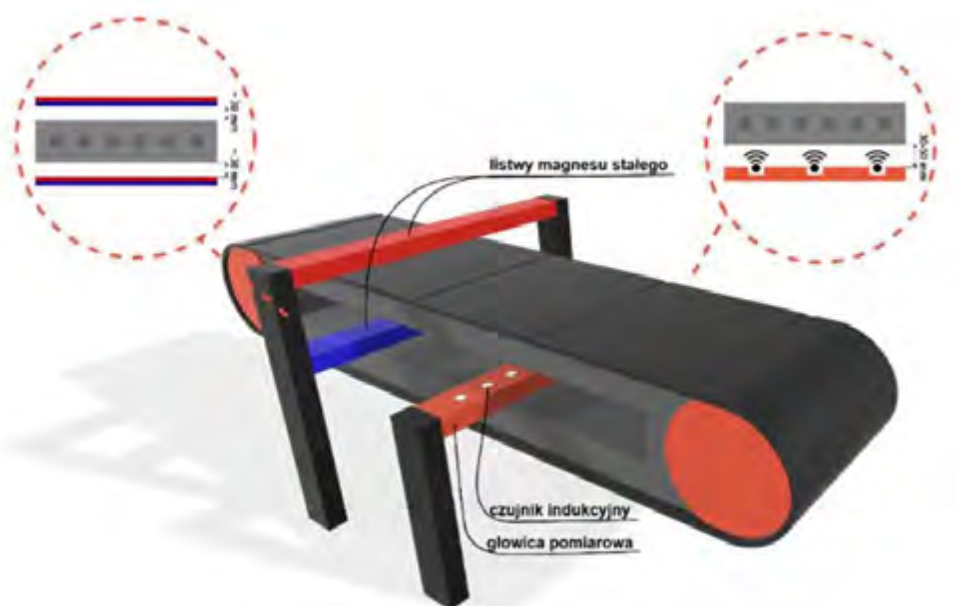
Uszkodzenia stalowego rdzenia taśmy mogą prowadzić do przestojów całych ciągów technologicznych, co może nieść ze sobą duże straty dla danego zakładu [2, 3]. Szacuje się, że transport przenośnikowy generuje od 12 do 15% całkowitych kosztów eksploatacyjnych zakładu [16]. Największy udział w tych wydatkach mają zużycie energii elektrycznej oraz koszty związane z bieżącą obsługą techniczną i wymianą elementów eksploatacyjnych – przede wszystkim taśm, które są szczególnie narażone na zużycie i uszkodzenia w trakcie intensywnej pracy [4–7].

W trakcie eksploatacji taśm dochodzi do stopniowego zużycia i uszkodzeń warstwy gumowej (okładek chroniących rdzeń), co może prowadzić do awarii i wymuszać nieplanowane przestoje w transporcie, skutkujące poważnymi stratami produkcyjnymi [3], ale też odsłaniać rdzeń, który jest głównym nośnikiem obciążenia taśmy [17, 18]. Zastosowanie bezinwazyjnych metod diagnostyki taśm stanowi rozwiązanie,

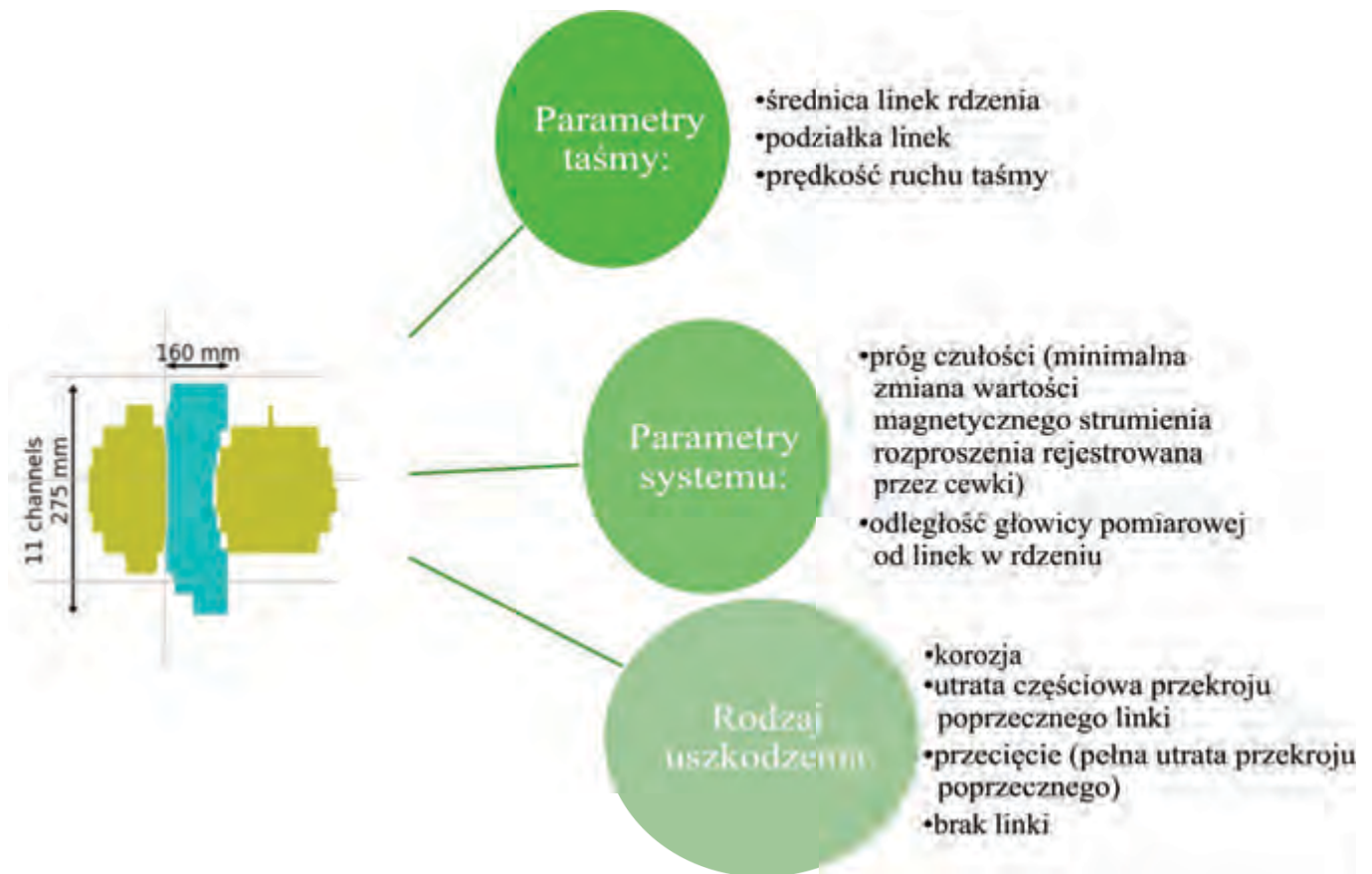
które ekonomicznie szybko się zwraca – wczesne wykrycie defektów umożliwia ich naprawę przed rozwinięciem się poważniejszych uszkodzeń, wydłużając tym samym żywotność taśm. Regularna kontrola i odpowiednia konserwacja pozwalają również lepiej planować działania serwisowe i ograniczyć ryzyko awarii [8–11].

W odpowiedzi na potrzebę wczesnej detekcji uszkodzeń taśm stalowych, opracowano system DiagBelt+, który wykorzystuje metodę magnetyczną do rejestracji uszkodzeń na podstawie zaburzeń pola magnetycznego. Działanie systemu opiera się na rejestracji zmian pola magnetycznego, zachodzących podczas przesuwania się uszkodzonej taśmy pod głowicą pomiarową [12,13]. Na rysunku 2 przedstawiono model 3D systemu DiagBelt+.

Nieciągłości w stalowych linkach rdzenia (uszkodzenia) powodują lokalne zaburzenia pola magnetycznego. W trakcie działania systemu rdzeń taśmy jest magnesowany za pomocą listew magnesów stałych zamontowanych zarówno nad, jak i pod badaną taśmą, wzbudzając tym samym pole magnetyczne w linkach rdzenia. Wszelkie zmiany pola pojawiające się w punktach nieciągłości rdzenia (uszkodzenia/naprawy lub połączenia taśm) wykrywane są przez cewki indukcyjne



Rys. 2. Model 3D systemu DiagBelt+ [14]
Fig. 2. 3D model of the DiagBelt+ system [14]



Rys. 3. Sygnał pomiarowy uszkodzenia rejestrowany przez system DiagBelt+ oraz czynniki wpływające na jego wielkość i kształt
Fig. 3. Damage measurement signal recorded by the DiagBelt+ system and factors influencing its magnitude and shape

głowicy pomiarowej, co umożliwia identyfikację miejsc występowania uszkodzeń [2].

Prawidłowe działanie systemu pomiarowego wymaga jednak ustalenia parametru odległości głowicy od taśmy (im dalej od namagnesowanego rdzenia, tym sygnał jest mniejszy z uwagi na kształt linii pola magnetycznego) oraz dobrania progu czułości systemu. Siła odczytywanego sygnału jest także zależna od prędkości ruchu taśmy, ten parametr jednak, w większości zastosowań przemysłowych, niemożliwy jest do modyfikacji – taśma pracuje na przenośniku z pewną prędkością.

Przykład wizualizacji sygnału pomiarowego z systemu DiagBelt+ oraz czynniki wpływające na jego wielkość przedstawiono na rysunku 3.

Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu parametrów pomiarowych systemu (odległość głowicy, prędkość taśmy, czułość systemu) na jakość sygnału

oraz wskazanie konfiguracji zapewniającej optymalną skuteczność detekcji.

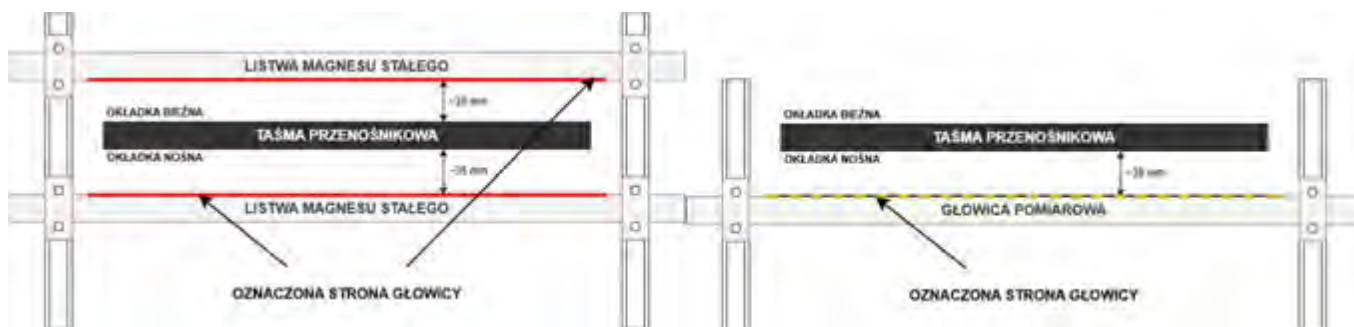
Metodyka badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym Politechniki Wrocławskiej, wyposażonym w system DiagBelt+ oraz taśmę przenośnikową typu ST1600 o szerokości 400 mm i długości pętli około 17,4 m. W taśmie występują sztucznie przygotowane uszkodzenia oraz połączenia taśmowe, symulujące rzeczywiste defekty eksploatacyjne. Wizualizacja i rzeczywisty obraz uszkodzeń na taśmie przedstawiono na rysunku 4.

W celu uproszczenia analizy wyników pomiarów zdecydowano się przeanalizować wybrane uszkodzenia przedstawione na schemacie na rysunku 4. Opis uszkodzeń uwzględnionych w analizie:



Rys. 4. Schemat uszkodzeń na badanej taśmie z pokazanymi realnymi zdjęciami wybranych uszkodzeń
Fig. 4. Diagram of damage on the tested belt with real photos of selected damages shown



Rys. 5. Schemat elementów montażowych systemu DiagBelt+ [14]

Fig. 5. Diagram of the mounting elements of the DiagBelt+ system [14]

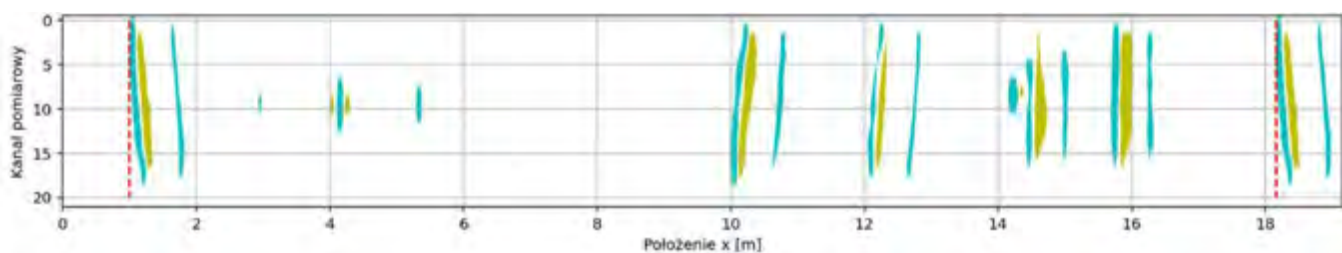
- Uszkodzenie 2 - U50. Uszkodzenie jednej linki poprzez ubytek około 50% przekroju poprzecznego
- Uszkodzenie 3 - U1. Przecięcie jednej linki.
- Uszkodzenie 4 - U3. Przecięcie trzech linek.
- Uszkodzenie 5 - U6. Przecięcie sześciu linek.
- Uszkodzenie 6 - B2. Brak linki na odległości 20 mm.

Uszkodzenia typu U1 nie zostały wychwycone ze względu na bardzo mały rozmiar rzeczywistego uszkodzenia, co uniemożliwiło ich jednoznaczną identyfikację. Uszkodzenia typu U7, U8 oraz korozja nie zostały uwzględnione w analizie z powodu zbyt bliskiego sąsiedztwa połączeń taśmy, których sygnały nachodziły na sygnały pochodzące od tych uszkodzeń. W warunkach kopalnianych połączenia taśm wykonywane są w znacznie większych odległościach, dlatego takie nakładanie się sygnałów nie powinno występować.

kompleksu parametrów pomiarowych. Ze względu na niską jakość otrzymanego obrazu uszkodzenia pominięto następujące warianty kombinacji: (30-1-12; 50-1-8; 50-1-10; 50-1-12; 50-3-12). Przykład sygnału dla jednej z pominiętych kombinacji przedstawiono na rysunku 6.

Dla każdej z kombinacji zarejestrowano 10 pełnych pętli pomiarowych, co umożliwiło ocenę powtarzalności wyników oraz redukcję wpływu losowych zakłóceń.

Na podstawie sygnałów rejestrowanych przez system DiagBelt+ wyznaczono trzy główne cechy sygnału: szerokość (wid [mm]), długość (len [mm]) oraz pole powierzchni (area [mm]). Dodatkowo obliczono zmienność pola sygnału (area_range) oraz oznaczono typ uszkodzenia (type). W celu dalszej analizy statystycznej obliczono wartości mediany dla każdego zestawu pomiarowego. Na rysunku 7 przedstawiono



Rys. 6. Wizualizacja przykładu niereprezentatywnej pętli pomiarowej odrzuconej z dalszej analizy

Fig. 6. Visualization of an example of a non-representative measurement loop rejected from further analysis

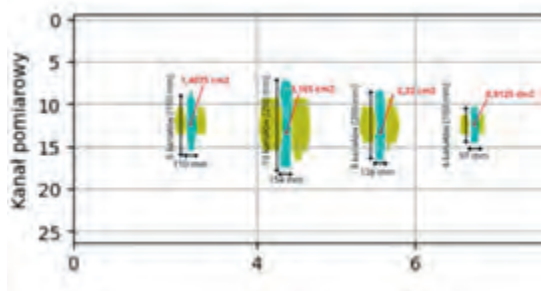
Na opisanym stanowisku laboratoryjnym zamontowano system pomiarowy DiagBelt+, jak przedstawiono schematycznie na rysunku 5.

Analiza uwzględniała trzy zmienne niezależne: odległość głowicy od taśmy (30 mm i 50 mm), prędkość taśmy (1 m/s, 3 m/s oraz 5 m/s) oraz próg czułości systemu (wartości od 2 do 12, z krokiem 2). Łącznie wykonano 31 unikalnych

przykładowe wyniki wraz z zaznaczonymi parametrami opisującymi ich wielkość.

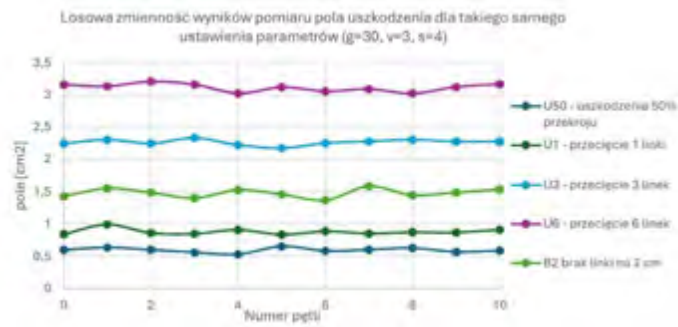
Opis omawianych parametrów:

- Szerokość uszkodzenia – liczona w kanałach pomiarowych (przekładając na mm, mnożymy przez 25 mm, ponieważ cewki pomiarowe w głowicy są rozmieszczone co 25 mm), opisuje, jak szeroko



Rys. 7. Przykładowe wyniki z zaznaczonymi wartościami szerokości, długości, pola powierzchni. Czerwony podpis oznacza pole, pozioma wielkość do długości, a pionowa to szerokość

Fig. 7. Example results with marked values of width, length, and surface area. Red label indicates an area; the horizontal dimension corresponds to length, and the vertical to width



Rys. 8. Zmienność wyników systemu DiagBelt+

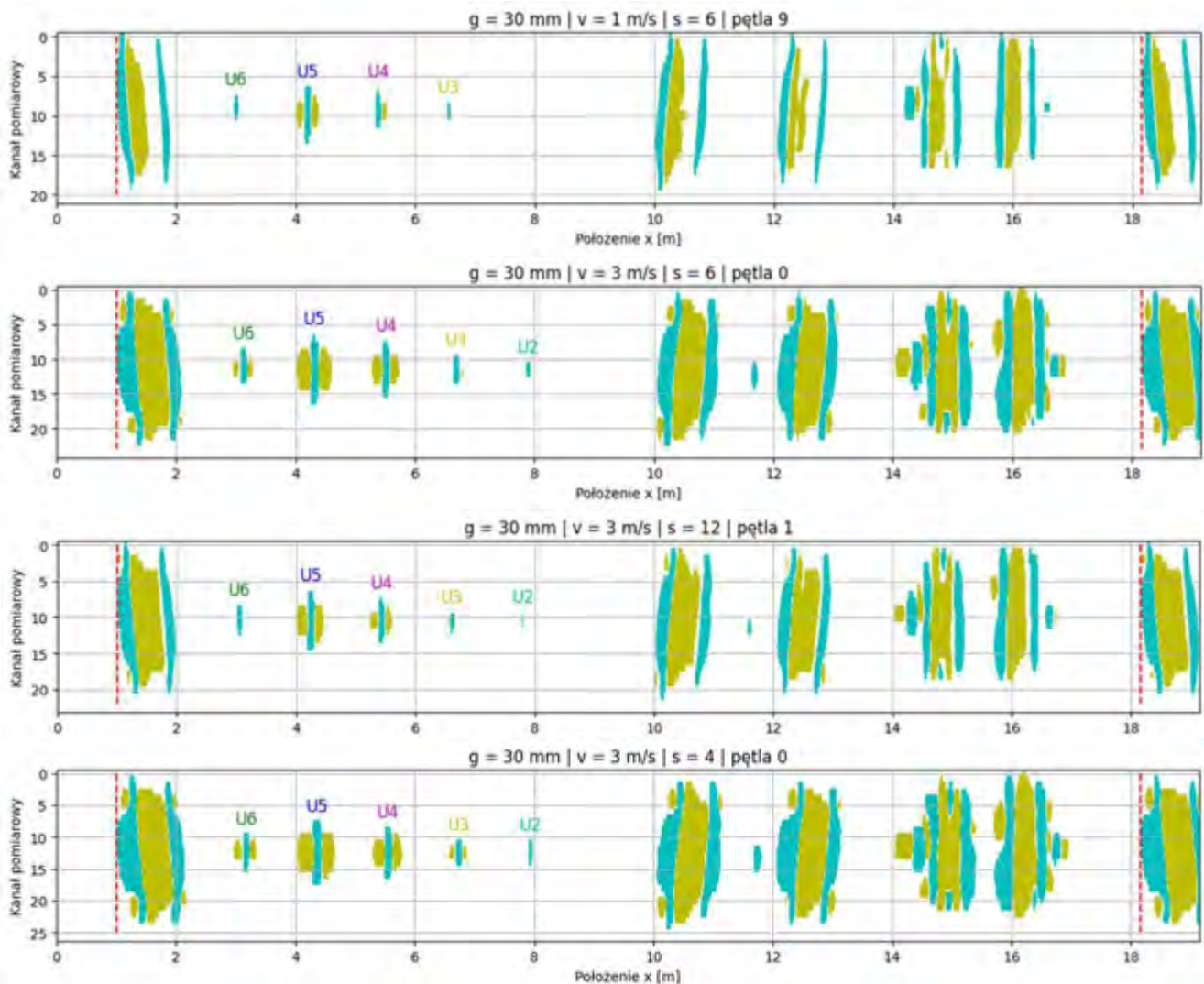
Fig. 8. Variability of the DiagBelt+ system results

na taśmie (w jej poprzek) rozciąga się wykryte uszkodzenie.

- Długość uszkodzenia – mierzona w mm, oznacza rozciągłość uszkodzenia wzdłuż kierunku ruchu taśmy.
- Pole powierzchni uszkodzenia – określane w cm^2 , jest to pole powierzchni otrzymanego sygnału uszkodzenia. Parametr ten pomaga w ocenie skali uszkodzenia.

Wyniki badań

W przebiegu prowadzonych badań wykonano test systemem DiagBelt+ tej samej taśmy przenośnikowej na 32 zestawach parametrów pomiarowych. Z uwagi na częstotliwość pracy systemu (400 Hz) oraz drobne wahania w biegu taśmy, dla każdego zestawu parametrów pomiarowych wykonano 10 pętli pomiarowych. Wykres przedstawiony na rysunku 8 pokazuje rozrzut wyników sygnału pomiarowego na kolejnych pętlach pomiarowych. Dlatego do dalszej analizy wartości przyjęto medianę z każdej serii pomiarowej.



Rys. 9. Wizualizacja pętli pomiarowej dla różnych zestawów parametrów

Fig. 9. Visualization of the measurement loop for different parameter sets

Wartość mierzonego parametru (szerokość, wysokość, bądź pole powierzchni) zależy także od wartości parametrów pomiarowych. Na rysunku 9 przedstawiono wygląd pętli pomiarowej dla różnych zestawów parametrów. Granice pętli (początek i koniec) oznaczono na wykresie czerwoną przerywaną linią. Analiza sygnałów dla różnych parametrów pomiarowych pokazuje, że zarówno wzrost prędkości pracy taśmy, jak i spadek progu czułości zmniejsza wielkość sygnału pomiarowego każdego uszkodzenia.

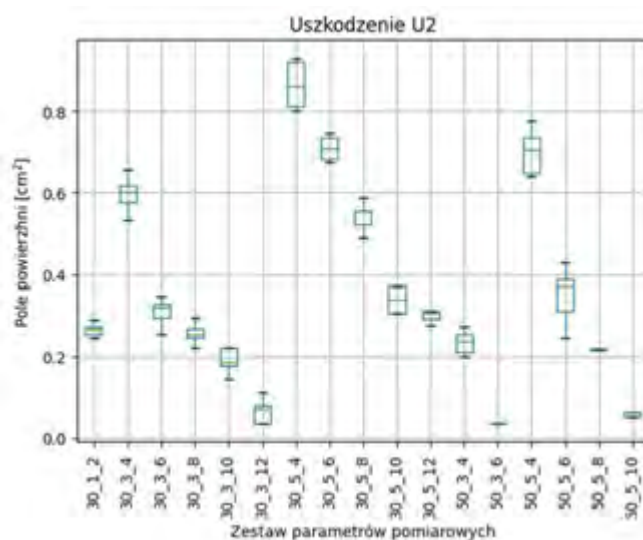
Na wykresie typu plot-box (rysunek 10) przedstawiono uzyskane wyniki wartości pola powierzchni uzyskanego sygnału dla danych na osi poziomej określonych zestawów parametrów. Oś OX na wykresie poniżej opisana jest w formacie g_b_c , gdzie:

- g – odległość od głowicy [mm],
- b – prędkość taśmy [m/s],
- c – próg czułości systemu DiagBelt+ [-].

Wraz ze wzrostem progu czułości uszkodzenia, zmniejsza się czułość detekcji uszkodzenia, stąd najmniejsze uszkodzenia (jak U2) nie są rejestrowane przy wysokim progu czułości. Analiza wykrywalności uszkodzeń, w zależności od prędkości taśmy, odległości głowicy od taśmy oraz ustawionego progu czułości przedstawiono na wykresach typu mapa ciepła (rysunek 11)

Najlepsze wyniki (najwięcej zlokalizowanych uszkodzeń) uzyskano przy ustawieniu głowicy na wysokości 30 mm, prędkości taśmy 3–5 m/s oraz progu czułości w zakresie 4–6. W tych warunkach sygnały były dobrze widoczne, czytelne i nie ulegały zniekształceniom. Pokazało to, że właśnie taka kombinacja parametrów daje najbardziej wiarygodne rezultaty.

Główną obserwacją z przeprowadzonych badań jest to, iż zbyt niski próg czułości (czyli wysoka czułość - s) powoduje zjawisko zlewania się sygnałów ze sobą i trudności w ich interpretacji. Z kolei zbyt wysoki próg czułości może sprawić, że małe uszkodzenia w ogóle nie zostaną wykryte.

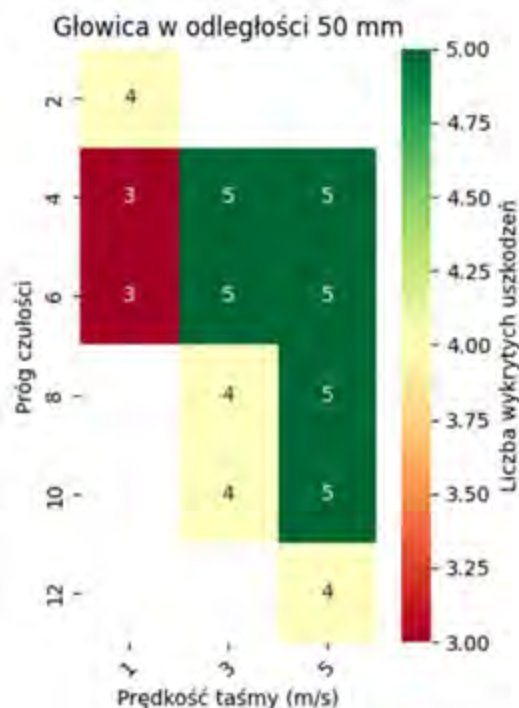
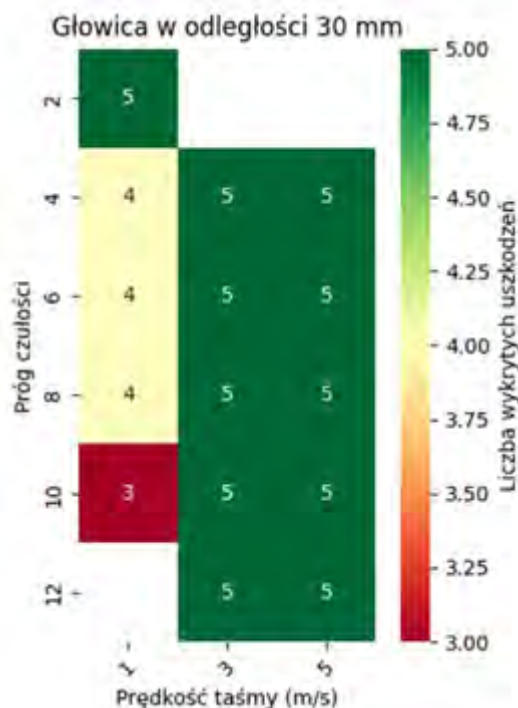


Rys. 10. Wykres ramka-wąsy przedstawiający zmienność mierzonego parametru sygnału (pole powierzchni) w zależności od nastaw parametru pomiarowego dla uszkodzenia typu U2 (uszkodzenie pojedynczej linki poprzez redukcję jej przekroju poprzecznego o 50%).

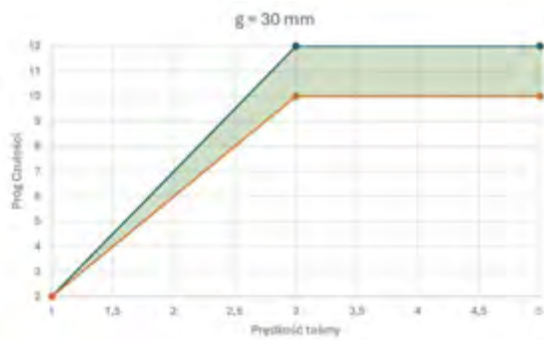
Figure 10. Box-and-whisker plot showing the variability of the measured signal parameter (surface area) depending on the measurement parameter setting for damage type U2 (single-wire damage by reducing its cross-sectional area by 50%).

Przykładem może być uszkodzenie U2, które jest mniej widoczne przy wysokim progu oraz ma większe pole powierzchni i jest znacznie lepiej widoczne na progu czułości 4.

Aby zapewnić najwyższą maksymalną jakość wykonanych badań i zapewnić wiarygodność dalszej interpretacji, należy odnaleźć kompromis między wielkością sygnału, a liczbą wykrywanych uszkodzeń. Wartości progów 8, 10 i 12 przy $v = 1$ m/s, próg 12 przy $v = 3$ m/s i odległości głowicy 50 mm oraz próg 12 przy $v = 1$ m/s i odległości głowicy 30 mm zostały odrzucone, ponieważ wyniki pomiarów były zakłócone i niemiarodajne. Dane te nie nadawały się do analizy, co zostało ręcznie sprawdzone podczas kontroli jakości pomiarów, jeszcze przed analizą

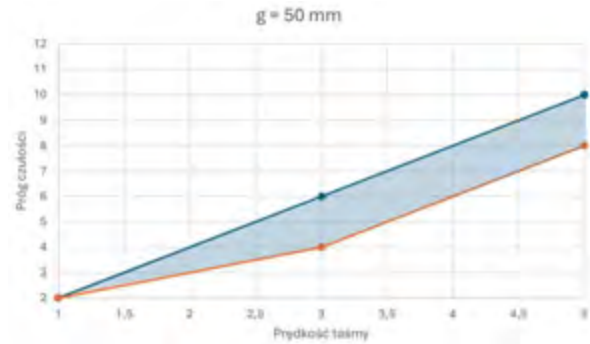


Rys. 11. Liczba wykrytych uszkodzeń dla różnych zestawów parametrów pomiarowych
Fig. 11. Number of detected damages for different measurement parameter sets



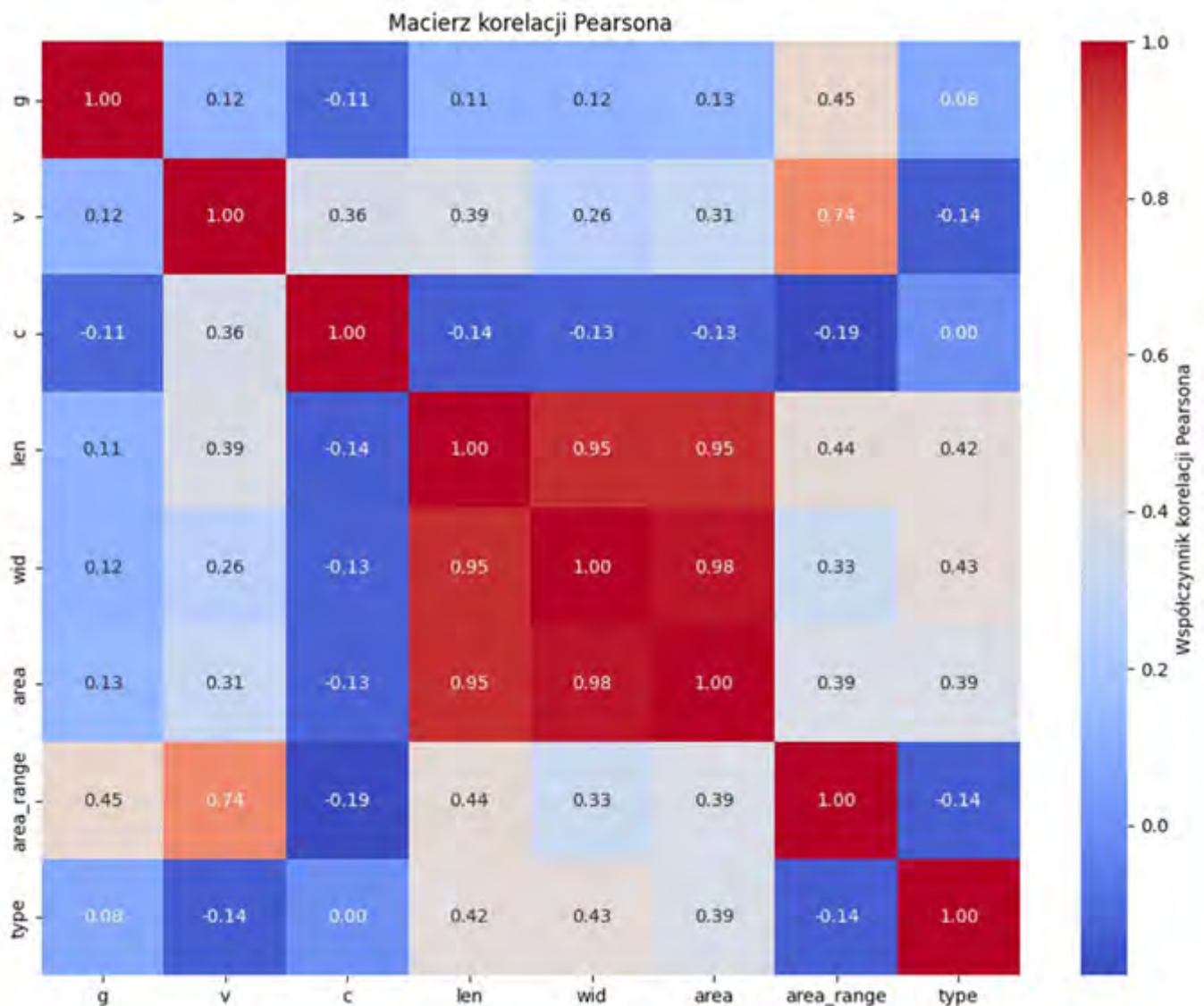
Rys. 12. Zakres rekomendowanych nastaw dla odległości głowicy 30 mm
Fig. 12. Range of recommended settings for a head distance of 30 mm

wyników. Niemierność wynikała z zanikania sygnału od uszkodzeń lub ich nakładania się na siebie, co uniemożliwiało jednoznaczną interpretację wyników. W związku z tym uznano za optymalne dobranie takich nastaw systemu, dla których możliwe jest wykrycie wszystkich pięciu uszkodzeń, a dodatkowo ich sygnały będą stabilne - niezlewające się. W wyniku przeprowadzonych prac ustalono następujące zakresy zalecanych parametrów czułości w stosunku do prędkości taśmy (rysunek 12 oraz 13).



Rys. 13. Zakres rekomendowanych nastaw dla odległości głowicy 50 mm
Fig. 13. Range of recommended settings for a head distance of 50 mm

Z uwagi na malejącą siłę sygnału magnetycznego przy oddalaniu się od powierzchni taśmy przenośnikowej, zalecany jest montaż urządzenia w odległości 30 mm – tak, by była możliwie najbliższej taśmie, ale nie została uszkodzona przy występujących w trakcie normalnej pracy taśmie drganiach. Umieszczenie głowicy pomiarowej w większej odległości (np. 50 mm) wpłynie na zmniejszenie jakości uzyskanych wyników i zwiększenie ich rozrzutu, jednak w sytuacji trudności w instalacji w odległości 30 mm, możliwe jest także



Rys. 14. Macierz korelacji liniowej Pearsona dla parametrów pomiarowych
Fig. 14. Pearson linear correlation matrix for measurement parameters

zainstalowanie jej w odległości 50 mm i dobór odpowiednich parametrów.

W celu identyfikacji współzależności pomiędzy zmiennymi wejściowymi a sygnałem diagnostycznym, obliczono współczynniki korelacji Pearsona. Analizie poddano następujące zmienne: g (odległość głowicy), v (prędkość taśmy), c (próg czułości), wid , len , $area$, $area_range$ oraz $type$.

Macierz korelacji przedstawiona na rysunku 14 wykazała istotne dodatnie związki pomiędzy długością (len) a szerokością (wid) oraz polem powierzchni ($area$) sygnału, z wartościami współczynników rzędu 0.95. Prędkość taśmy (v) korelowała dodatnio z zakresem zmienności sygnału ($area_range$, $r=0.74$), wskazując, że szybciej poruszająca się taśma skutkuje większym rozrzutem wielkości sygnału.

Analiza korelacji Pearsona ujawnia szereg istotnych zależności między zmiennymi eksperymentalnymi a mierzonymi cechami sygnału diagnostycznego. W szczególności:

Długość (len) i szerokość (wid) sygnału wykazują bardzo silną dodatnią korelację ($r \approx 0.95$), co sugeruje, że uszkodzenie postępuje tak samo wzdłuż osi OX, jak wzdłuż osi OY. Może to wynikać z faktu, że uszkodzenia o większym zasięgu przestrzennym generują zarówno szerszy, jak i dłuższy sygnał.

- Długość (len) i pole powierzchni ($area$) również są silnie skorelowane ($r \approx 0.95$), co jest zgodne z intuicją – dłuższy sygnał o ustalonej szerokości prowadzi do większej powierzchni.
- Prędkość taśmy (v) i zmienność sygnału ($area_range$) wykazują umiarkowaną dodatnią korelację ($r \approx 0.74$). Oznacza to, że przy większych prędkościach ruchu taśmy dochodzi do większego zróżnicowania (rozciągnięcia) sygnału – może to być spowodowane dynamiką pola magnetycznego rejestrowanego przez cewki.
- Próg czułości (c) wykazuje ujemną korelację z cechami sygnału ($area$, wid , len) – co potwierdza wcześniejsze obserwacje: przy wyższych progach czułości system ignoruje słabsze sygnały, co skutkuje skróceniem i zawężeniem wykrywanego sygnału diagnostycznego.
- Odległość głowicy (g) nie wykazuje silnych korelacji liniowych, co może sugerować, że jej wpływ jest nieliniowy lub zależny od innych zmiennych (np. prędkości czy typu uszkodzenia).
- Typ uszkodzenia ($type$) koreluje umiarkowanie z $area$ i $area_range$, co sugeruje, że niektóre typy defektów (np. całkowite zerwanie linki) są bardziej rozpoznawalne niż inne (np. częściowa redukcja przekroju).

Powyższe zależności są istotne nie tylko z punktu widzenia oceny skuteczności systemu, ale także mogą stanowić podstawę do stworzenia modelu predykcyjnego pozwalającego automatycznie klasyfikować lub szacować typ uszkodzenia na podstawie cech geometrycznych sygnału. Takie badania są już podejmowane [15].

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że działanie systemu DiagBelt+ jest silnie zależne od ustawień parametrów pomiarowych, które należy starannie dobierać w zależności od warunków pracy i oczekiwanej dokładności diagnostycznej. Największy wpływ na jakość i czytelność sygnałów mają dwa czynniki: próg czułości oraz prędkość taśmy. Zbyt niskie progi czułości prowadzą do zjawiska zlewania się sygnałów pochodzących z różnych źródeł (np. sąsiadujących uszkodzeń), co utrudnia jednoznaczną interpretację. Z kolei progi zbyt wysokie powodują całkowite pomijanie mniejszych uszkodzeń, które w warunkach przemysłowych mogą z czasem prowadzić do poważnych awarii.

Kolejnym czynnikiem jest odległość głowicy od taśmy – im bliżej rdzenia znajduje się głowica, tym silniejszy i bardziej spójny sygnał jest rejestrowany. Jednak należy pamiętać, że zbyt mała odległość zwiększa ryzyko uszkodzenia sensora przy drganiach mechanicznych taśmy.

Analiza korelacji Pearsona wykazała silne zależności pomiędzy geometrycznymi cechami sygnału, co wskazuje, że parametry takie jak długość, szerokość czy powierzchnia nie są od siebie niezależne, lecz współwystępują i mogą być użyte do modelowania rodzaju i wielkości uszkodzenia. Otwiera to możliwość wykorzystania narzędzi analizy statystycznej i sztucznej inteligencji w celu automatyzacji procesu diagnostycznego.

Podsumowując, DiagBelt+ to skuteczny system detekcji uszkodzeń taśm z rdzeniem stalowym, jednak jego skuteczność zależy w dużej mierze od poprawnej konfiguracji parametrów. Odpowiednia kalibracja – uwzględniająca specyfikę przenośnika, specyfikację badanej taśmy, typ uszkodzeń, które chcemy diagnozować – pozwala znacząco zwiększyć niezawodność wykrywania, a tym samym zapobiegać kosztownym przestojom w eksploatacji. Wyniki te stanowią podstawę do dalszych badań w warunkach rzeczywistych oraz rozwoju narzędzi wspomagających automatyczne ustawianie parametrów systemu w oparciu o dane wejściowe.

Literatura

- [1] Kawalec W. *Przenośniki taśmowe dalekiego zasięgu do transportu węgla brunatnego*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2009; 1:6–13.
- [2] Błażej R. *Ocena stanu technicznego taśm przenośnikowych z linkami stalowymi*. 1st ed. Wrocław: Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej; 2018.
- [3] Bugaric U, Tanasijevic M, Polovina D, Ignjatovic D, Jovancic P. *Lost production costs of the overburden excavation system caused by rubber belt failure*. Eksploatacja i Niezawodność 2012;14.
- [4] Bajda M, Jurdziak L, Pactwa K, Woźniak J. *Energy-Saving of Conveyor Belts in the Strategy and Reporting of Corporate Social Responsibility Initiatives of Producers*, 2022, p. 402–14. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90532-3_31.
- [5] Bajda M, Hardygóra M. *Laboratory tests of operational durability and energy-efficiency of conveyor belts*. IOP Conf Ser Earth Environ Sci, vol. 261, 2019. <https://doi.org/10.1088/17551315/261/1/012002>.
- [6] Youssef G. *Development of Conveyor Belts Design for Reducing Energy Consumption in Mining Application*. master thesis. Ain Shams University, 2016.
- [7] Bajda M, Hardygóra M. *Analysis of the influence of the type of belt on the energy consumption of transport processes in a belt conveyor*. Energies (Basel) 2021;14. <https://doi.org/10.3390/en14196180>.
- [8] Jurdziak L, Błażej R, Kirjanów-Błażej A, Rzeszowska A. *Transverse Profiles of Belt Core Damage in the Analysis of the Correct Loading and Operation of Conveyors*. Minerals 2023; 13:1520. <https://doi.org/10.3390/min13121520>.
- [9] Jurdziak L, Błażej R, Kirjanów-Błażej A, Rzeszowska A. *Trends in the Growth of Damage Extents in a Steel Conveyor Belt's Core*. Minerals 2024; 14:174. <https://doi.org/10.3390/min14020174>.
- [10] Błażej R, Jurdziak L, Kirjanów-Błażej A, Bajda M, Olchówka D, Rzeszowska A. *Profitability of conveyor belt refurbishment and diagnostics in the light of the circular economy and the full and effective use of resources*. Energies (Basel) 2022;15. <https://doi.org/10.3390/en15207632>.
- [11] Jurdziak L, Błażej R, Rzeszowska A. *Non-Destructive Diagnostics in the Assessment of Splice Geometry in Steel Cord Conveyor Belts*. Applied Sciences 2025; 15:5034. <https://doi.org/10.3390/app15095034>.
- [12] Jurdziak L, Błażej R, Kirjanów-Błażej A, Rzeszowska A, Kostrzewa P. *Improving the effectiveness of the DiagBelt+ diagnostic system - analysis of the impact of measurement parameters on the quality of signals*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2024. <https://doi.org/10.17531/ein/187275>.
- [13] Błażej R, Jurdziak L, Kozłowski T, Kirjanów A. *The use of magnetic sensors in monitoring the condition of the core in steel cord conveyor belts – Tests of the measuring probe and the design of the DiagBelt system*. Measurement 2018; 123:48–53. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.051>.
- [14] Politechnika Wrocławska. DiagBeltPlus [Internet]. Wrocław: Politechnika Wrocławska; 2024 [cited 2025 Oct 29]. Available from: <https://diagbeltplus.pwr.edu.pl/>
- [15] Rzeszowska A, Jurdziak L, Błażej R, Kirjanów-Błażej A. *Application of Clustering and SOM Analysis for Identification of Conveyor Belt Damage Based on Data from the Diagbelt + Magnetic System*, 2023, p. 461–75. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45021-1_35.
- [16] Hardygóra, M., Komander, H., & Bajda, M. (2011). *Energooszczędne taśmy przenośnikowe dla kopalń węgla brunatnego*.
- [17] Komander H, Bajda M, Komander G, Paszkowska G. *Effect of Strength Parameters and the Structure of Steel Cord Conveyor Belts on Belt Puncture Resistance*. AMM 2014; 683:119–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.683.119>.
- [18] Bajda, Mirosław & Henryk, Komander & Hardygóra, Monika & Komander, Grzegorz & Lewandowicz, Paweł. (2016). *Assessment methods of conveyor belts impact resistance to the dynamic action of a concentrated load*. 10.13140/RG.2.1.4199.8484.