



POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

Wspomaganie utrzymania i obsługi taśmociągów za pomocą sztucznej inteligencji oraz wydajnych algorytmów analitycznych

Mgr inż. Przemysław Rumin

Promotor: Prof. dr hab. inż. Janusz KOTOWICZ

Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Gliwice, 06.2024

Autor: Mgr inż. Przemysław Rumin
Szkola Doktorów
ul. Akademicka 2a
44-100 Gliwice
e-mail: Przemyslaw.Rumin@polsl.pl

Promotor: Prof. dr hab. inż. Janusz KOTOWICZ
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: Janusz.Kotowicz@polsl.pl

Podziękowania

Mojemu Promotorowi prof. Dr hab. Januszowi Kotowiczowi za wskazywanie właściwych kierunków i wsparcie na wszystkich etapach pracy.

Mojemu opiekunowi pomocniczemu Dr Kilian Neubert oraz Jarosławowi Gorczyńskiemu i Krzysztofowi Porwołowi za stworzenie przyjaznego środowiska pracy oraz wsparcie w przecieraniu trudnych ścieżek w obszarze firmy.

Mojej żonie Annie oraz dzieciom Zuzi, Basi i Karolowi za bycie ze mną w trudnych momentach oraz wyrozumiałość w sytuacjach w których musiałem poświęcić czas osobisty. Jednocześnie bardzo chciałbym podziękować moim Rodzicom, absolwentom wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Śląskiej, za inspirację i zaszczepienie zainteresowania.

Spis treści

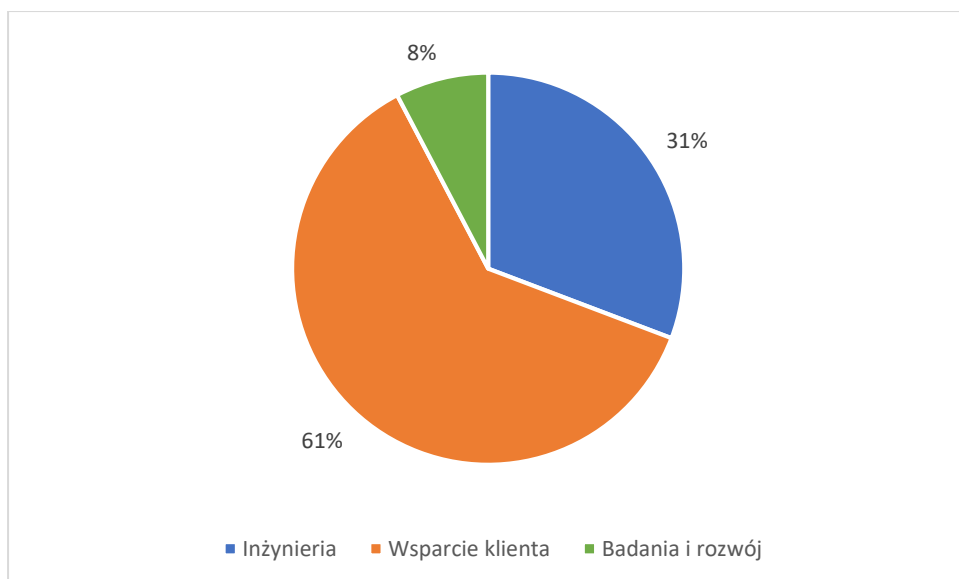
1.	Wprowadzenie	6
1.1.	Monitorowanie taśmy i jej zawartości	11
1.2.	Monitorowanie krążników	14
1.3.	Cel i zakres pracy.....	16
2.	Przemysł 4.0.....	18
2.1.	Cyfrowy bliźniak	18
2.2.	Profilaktyka awarii	19
3.	Opis badanego przenośnika	21
4.	Zbieranie danych	27
4.1.	Zarządzanie danymi przesyłanymi z instalacji.....	28
4.2.	Zbieranie i agregacja danych	29
4.2.1.	Język zapytań DSL	29
4.2.2.	Interfejs graficzny Kibana	30
5.	Tworzenie modelu	31
6.	Obliczenia Analityczne.....	38
6.1.	Opory główne oraz drugorzędne wg DIN 22101	39
6.1.1.	Opory główne	39
6.1.2.	Opory drugorzędne	39
6.2.	Opory główne oraz drugorzędne według obliczeń szczegółowych.....	40
6.2.1.	Opory główne	40
6.2.2.	Opory drugorzędne	42
6.3.	Opory związane ze zmianą geometrii.....	43
6.4.	Opory specjalne	43
6.5.	Wyznaczenie naprężenia taśmy oraz przesunięcia taśmy na łukach	47
7.	Dopasowanie modelu przenośnika za pomocą mechanizmów uczenia maszynowego	51
7.1.	Metoda gradientu.	51
7.2.	Strategia dopasowania.....	53
7.2.1.	Pomiary przesunięcia taśmy, bębna napinającego oraz mocy chwilowej silników	53
7.2.2.	Pomiary bębna napinającego oraz mocy chwilowej silników	55
8.	Architektura systemu	56
9.	Cyfrowy bliźniak przenośnika taśmowego	59

10. Przewidywanie ryzyka awarii	62
10.1. Przewidywanie wymaganej mocy silników	62
10.1.1. Uczenie maszynowe	62
10.1.2. Przygotowanie danych	64
10.1.3. Estymacja mocy silników.....	66
10.2. Wyznaczanie ryzyka obrotu taśmy	74
10.2.1. Problem obrotu taśmy na badanym przenośniku.....	74
10.2.2. Procedura wykrywania ryzyka obrotu taśmy.....	77
10.2.3. Wyznaczanie masy materiału na sekcjach przenośnika	78
10.2.4. Wyznaczanie mocy silników oraz naprężeń na przenośniku.....	79
10.2.5. Algorytm podejmowania decyzji	80
10.2.6. Opis przeprowadzonych symulacji	81
10.3. Wyznaczenie ryzyka zbyt dużego przesunięcia taśmy.....	85
10.3.1. Procedura wykrywania ryzyka zbyt dużego przesunięcia taśmy.....	85
10.3.2. Algorytm podejmowania decyzji	86
10.3.3. Wyniki symulacji.....	87
10.4. Wyznaczanie czasu życia krążników i identyfikacja krążników wymagających wymiany.....	91
10.4.1. Wyznaczenie sił działających na łożyska.....	91
10.4.2. Wyznaczania czasu życia krążników.....	94
10.4.3. Algorytm podejmowania decyzji	97
10.4.4. Wyniki symulacji.....	100
11. Podsumowanie i wnioski	109
Bibliografia	112
Spis rysunków	118
Spis tablic.....	120
Załączniki	121
Streszczenie	136
Abstract	138

1. Wprowadzenie

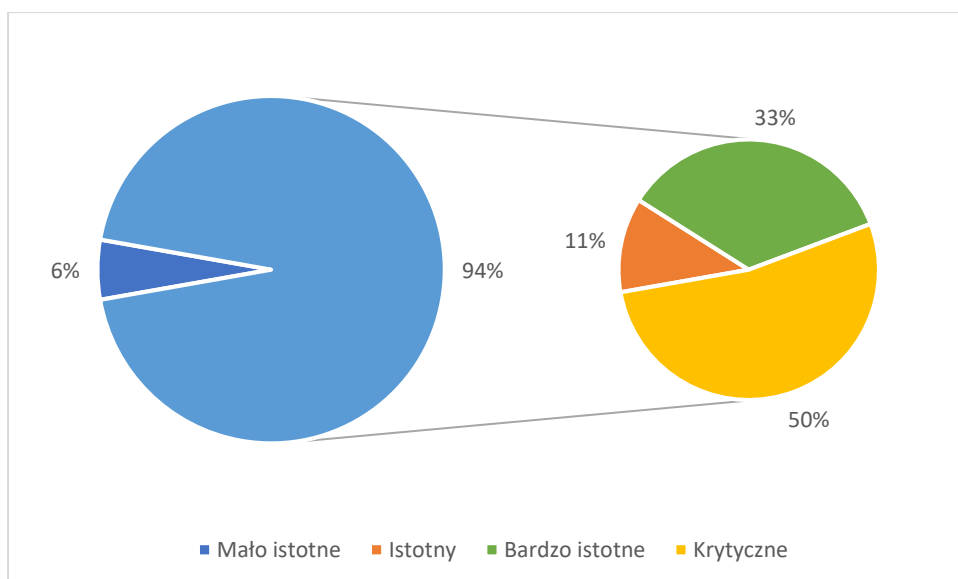
Przenośniki taśmowe są urządzeniami powszechnie stosowanymi w przemyśle. Instalacje tego typu posiadają szereg zastosowań i można je spotkać w wielu branżach wszędzie tam, gdzie istnieje konieczność przetransportowania obiektów po stałej trasie i ze stałą prędkością. Praca skupia się na przenośnikach taśmowych służących do transportu materiałów sypkich. Takie instalacje najczęściej spotykane są w przemyśle wydobywczym oraz energetycznym. Instalacje przenośników posiadają zróżnicowaną długość od kilku metrów do kilkunastu kilometrów. Jednocześnie nowoczesne instalacje posiadają znaczną wydajność sięgającą tysięcy ton przetransportowanego materiału w ciągu godziny [1]. Alternatywą dla transportu materiałów sypkich na znaczne odległości jest min. transport kołowy. Wprowadzenie przenośników może znacząco ograniczyć oddziaływanie na środowisko poprzez zastąpienie transportu kołowego, transportem bez emisyjnym. Dodatkowo transport za pomocą przenośnika ogranicza generowany hałas w porównaniu do transportu kołowego oraz znacząco zwiększa możliwości ochrony przed zapyleniem generowanym przez sam materiał podczas transportu. Jednak, aby przenośnik mógł spełnić oczekiwania ilość występujących awarii musi być ograniczona do minimum. Jest to istotne, ponieważ nieoczekiwana krytyczna awaria może zatrzymać cały przenośnik, a przez to zatrzymać pracę przedsiębiorstwa. W porównaniu do transportu kołowego jest to wada, ponieważ transport ten jest znacznie mniej podatny na awarii krytyczne ze względu na rozproszenie środków transportu.

Jednym z pierwszych etapów pracy było przeprowadzenie studiów literaturowych w zakresie monitorowania przenośników taśmowych, których efektem była publikacja naukowa [2]. Równoległe przeprowadzono badania wśród pracowników firmy BEUMER odnośnie do oczekiwań, potrzeb i wagi diagnostyki poszczególnych elementów. Ankieta została przeprowadzona na grupie 24 osób z których 31% związanych było z projektowaniem przenośników, 61% z obsługą klienta w tym z obsługą istniejących instalacji, natomiast 8% badanych pracowało w dziale badań i rozwoju.

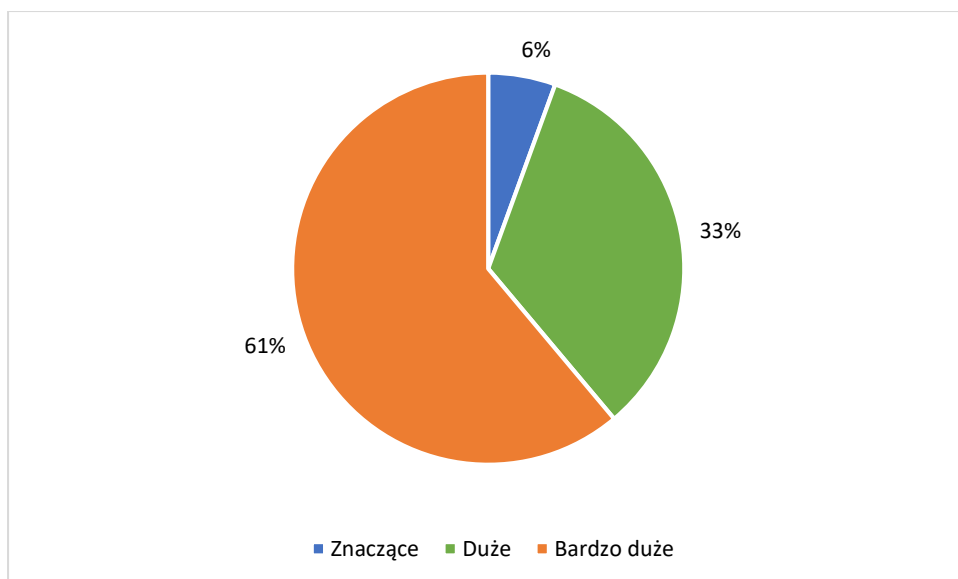


Rysunek 1.1 Obszary pracy badanych osób.

W ramach badania zapytano o szereg kwestii mogących pomóc w wyborze odpowiednich kierunków badań. W pierwszej kolejności zapytano o wagę monitorowania taśmy transmisyjnej. Wśród badanych aż 94% określiło, iż monitorowanie taśmy jest kwestią ważną w tym aż 50% że krytyczną. Dodatkowo wśród badanych ponad 67% badanych uznało, że wczesne wykrywanie awarii jest ważne bądź bardzo ważne.

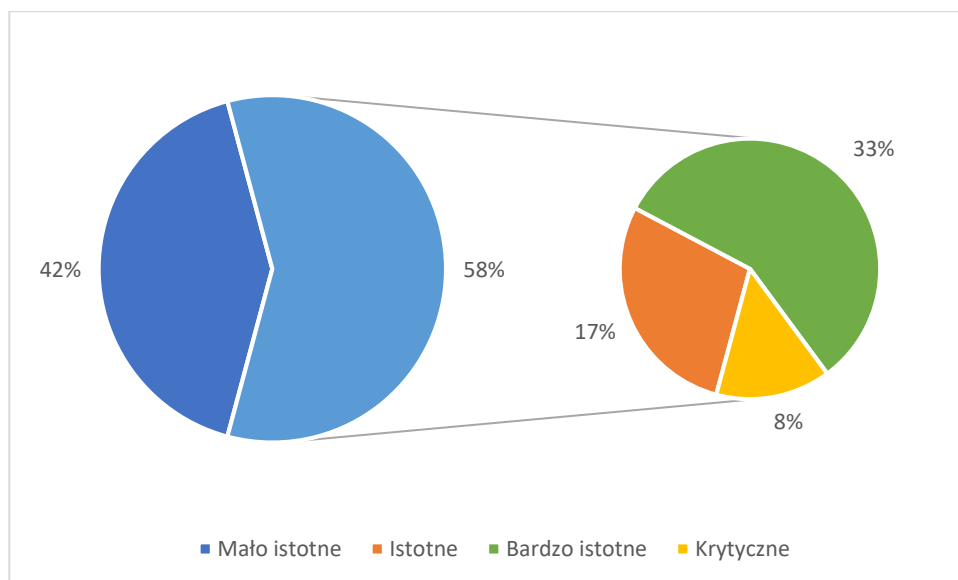


Rysunek 1.2 Jak istotne jest monitorowanie taśmy transmisyjnego.

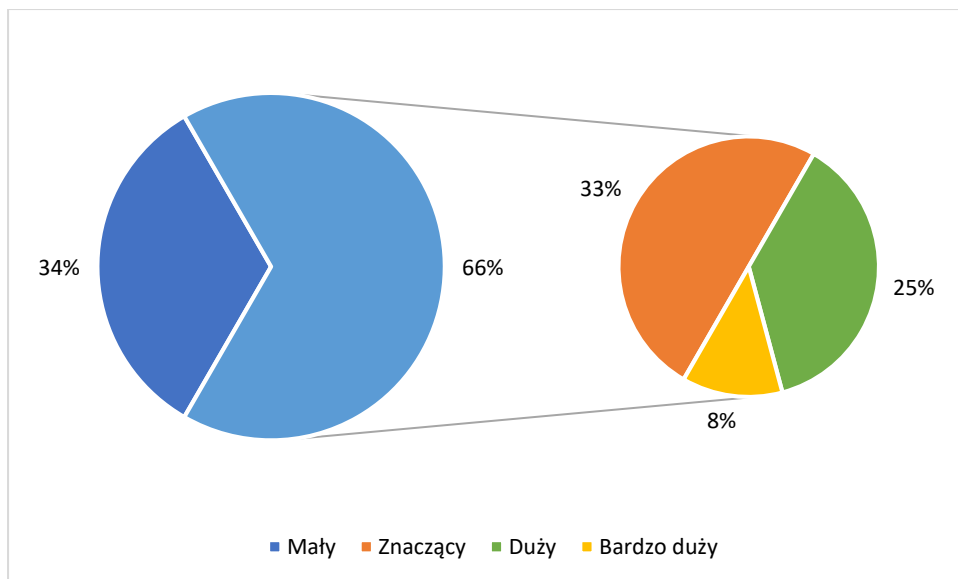


Rysunek 1.3 Potencjalne zyski z wykrywania awarii taśmy na wczesnym etapie.

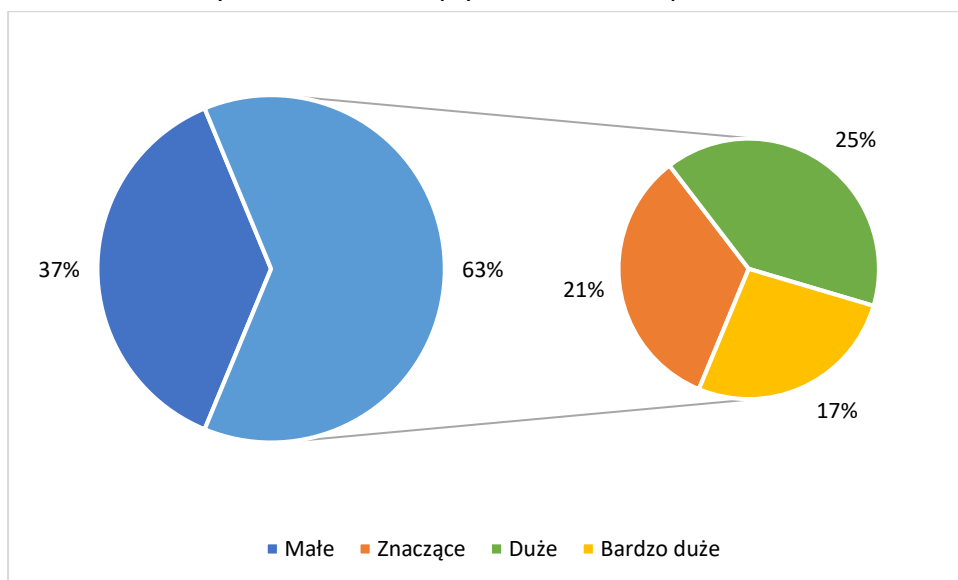
Osoby związane z tematem przenośników taśmowych zapytano również o kwestię monitorowania stanu krążników. Niepełna 60% osób stwierdziło, iż monitorowanie krążników jest ważne, przy czym ponad 40% że bardzo ważne bądź krytyczne. 66% osób stwierdziło, iż awaria krążniki ma przynajmniej znaczący wpływ na działanie przenośnika, a 63% osób uważało, że monitorowanie krążników może przynieść znaczące zyski.



Rysunek 1.4 Jak istotne jest monitorowanie krążników.

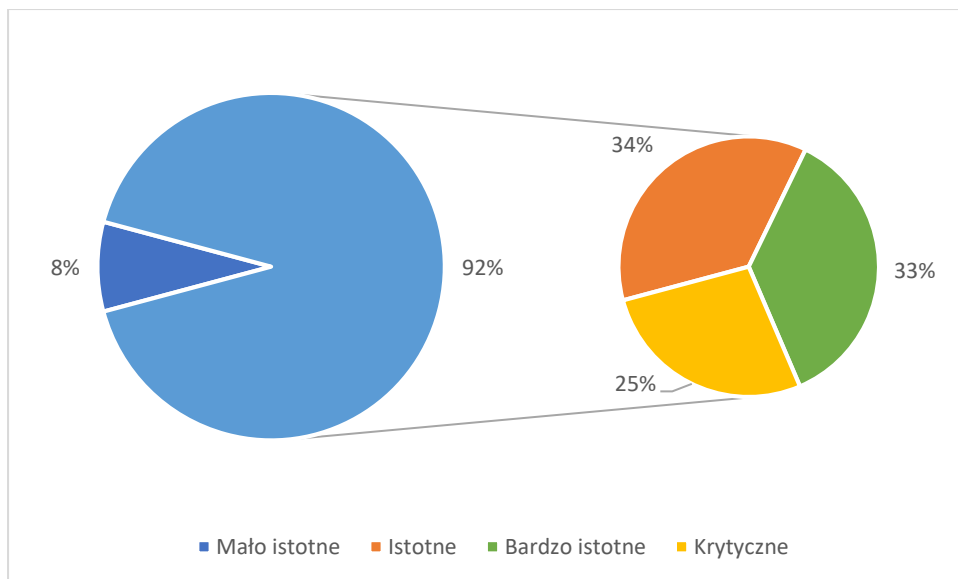


Rysunek 1.5 Jaki wpływ na działanie przenośnika ma awaria krążniki.

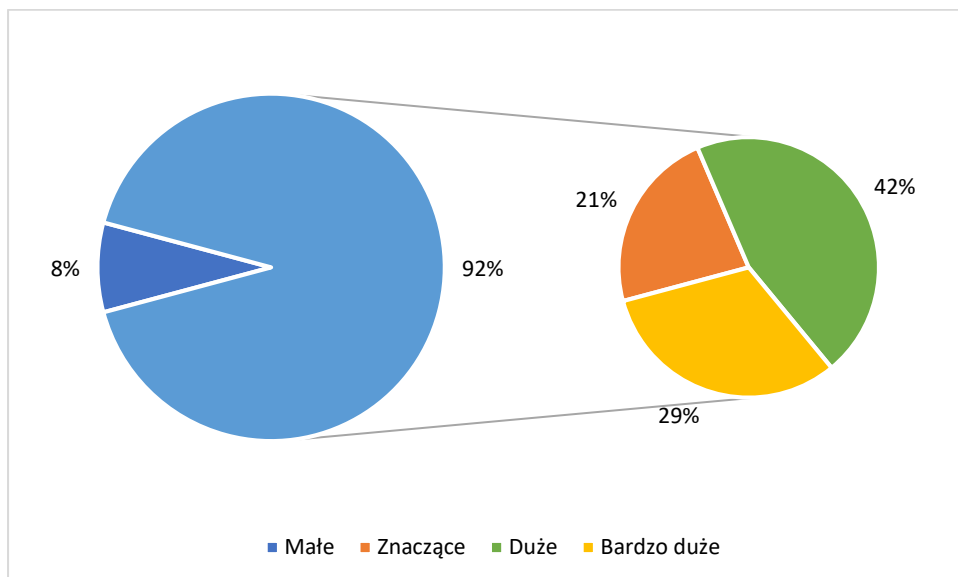


Rysunek 1.6 Potencjalne zyski z wykrywania awarii krążniki na wczesnym etapie.

Kolejnym pytaniem w ankiecie dotyczyło tematów związanych z napędem przenośników. W tym przypadku ponad 90% osób stwierdziło, iż monitorowanie stanu napędu jest ważne, przy czym 25% że jest krytyczne. 92% osób uznało również, że monitorowanie stanu napędu może przynieść znaczące zyski.



Rysunek 1.7 Jak istotne jest monitorowanie napędu.



Rysunek 1.8 Potencjalne zyski z wykrywania awarii napędu na wczesnym etapie.

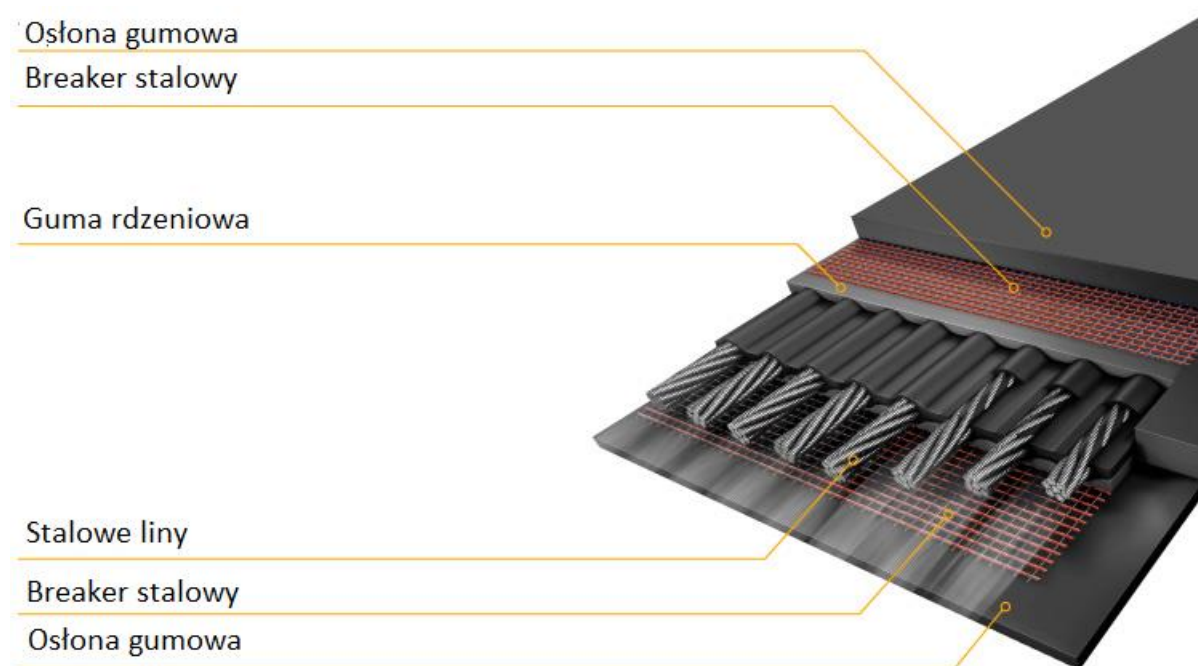
Z pozostałych pytań zamieszczonych w ankiecie wynika, iż monitorowanie pozostałych elementów tj. konstrukcja, miejsca ładowania czy rozładunku, nie jest tak istotne oraz obecny stan jakości monitoringu jest wystarczający. Z ankiety wynika, iż czasami występują aspekty związane ze specyfiką danego projektu lub oczekiwań klienta, jednakże są to przypadki szczególne. Nieco inaczej kwestia wygląda w przypadku napędów. Z ankiety wynika, iż są to elementy kluczowe do monitoringu, jednakże ze względu, iż są to elementy dostarczane kompleksowo od producentów, posiadają one w większości przypadków bardzo dobrą wbudowaną diagnostykę. Dodatkowo elementy te są umieszczone w miejscach, o bardzo dobrej infrastrukturze, a zgodnie z oczekiwaniami postawionymi przed pracą jest

wspomaganie miejsc, które do tej pory posiadały najłabszą diagnostykę. Niemniej jednak monitoring napędu najczęściej sprowadza się do pomiarów parametrów operacyjnych oraz temperatury i wibracji. Ma to odzwierciedlenie również w badaniach naukowych odnośnie silników i kół pasowych, które opierają się głównie o pomiary wibracji [3] i temperatury [4]. Przebadano również przyczyny zniszczenia koła pasowego [5] oraz wpływ nadmiarowych wibracji na występowania awarii [6].

Z powodów wyszczególnionych powyżej w dalszej pracy, rozważania koncentrują się wokół monitorowania taśmy i krążników.

1.1. Monitorowanie taśmy i jej zawartości

Ze względu, iż główny temat badań dotyczy przenośników taśmowych o dużych rozmiarach i skomplikowanej geometrii zawierającej zakręty i wzniesienia rozważany będzie typ taśmy z stalowymi linami. Taśmy takie charakteryzują się niską wydłużalnością oraz długą żywotnością. Taśma taka zbudowana jest z ocynkowanych lin stalowych umieszczonych wzdłużnie, zwulkanizowanych w gumie rdzeniowej. Następnie umieszczone są często stalowe breakery stanowiące ochronę przed przebiciem. Zewnętrzną warstwę taśmy stanowi osłona gumowa [7].



Rysunek 1.9 Budowa taśmy z linami stalowymi [8]

Taśma jest jednym z najważniejszych elementów przenośnika. W przypadku jego awarii konieczne jest zatrzymanie pracy taśmociągu a następnie jego naprawa bądź wymiana. W obu

przypadkach przestój w pracy może być długotrwały. Monitorowanie stanu taśmy można podzielić na trzy obszary analiz tj.:

- spójność konstrukcyjna,
- zachowania się taśmy podczas transportu,
- zawartości taśmy.

W ramach badania spójności konstrukcyjnej Bortnowski [9] przeprowadził przegląd występujących awarii wraz z ich klasyfikacją i wzajemnymi zależnościami. W swoich badaniach min. wyróżnił:

- zużycie gumowej osłony taśmy
- przebicie i przecięcia gumowej osłony taśmy,
- rozdarcia taśmy

Obecnie na rynku funkcjonuje wiele firm oferujących różnorodne rozwiązania pozwalające na wykonywanie diagnostyki stanu taśmy. Oferowane są zarówno rozwiązania proste i łatwe w aplikacji jak systemy o rozbudowanej infrastrukturze. Poniżej został zamieszczona list wybranych systemów wraz z ich typem oraz istniejącymi dostawcami:

- **Mechaniczne wykrywanie rozdarcia: lina** – wykonane ze stalowych lin lub przewodów zamontowanych pod pasem. Zasada działania opiera się na założeniu, że części uszkodzonego pasa będą uderzać w przewód. Urządzenie takie umieszcza się bezpośrednio po ładowaniu oraz rozładowaniu przenośnika. Charakteryzują się łatwą instalacją. Przykładowi dostawcy to Kiepe Elekrik [10], Wm. Neundorfer & Co. [11], Conveyor Components Comapany [12]
- **Mechaniczne wykrywanie rozdarcia: łańcuch** – działa analogicznie jak w przypadku użycia liny. Przykładowy dostawca Bramco Electronics [13]
- **Mechaniczne wykrywanie rozdarcia: Ramię obrotowe** – zostało użyte ramię obrotowe. W przypadku uszkodzenia taśmy rama zostanie uderzona a następnie obróci się. Obrót aktywuje przełącznik, który daje sygnał do zatrzymania przenośnika. Charakteryzuje się niskimi kosztami utrzymania. Przykładowy producent ARCH [14].
- **Mechaniczne wykrywanie rozdarcia: Elektryczny wyłącznik udarowy** – montowany jest między krążnikami udarowymi w obszarze podawania. W przypadku uszkodzenia pasa czujnik zostanie wciśnięty, a przenośnik zostanie zatrzymany. Przykładowy producent Matsushima Measure Tech Co [15].

- **Wykrywanie rozdarcia za pomocą wbudowanej cewki indukcyjnej** - Pętle są wulkanizowane w górnej lub dolnej pokrywie pasa. W przypadku gdy ciało obce przeniknie przez taśmę i pętla zostanie przecięta, sytuację taką wykrywa czujnik który następnie wyłącza napęd przenośnika. Przykładowy producent Becker Mining [16] oraz przykładowy producent Contitech [17].
- **Wykrywanie rozdarcia za pomocą wbudowanej anteny RFID** – Zasada działania podobna do metody z wbudowaną cewką indukcyjną. Przykładowy producent REMA TipTop [18].
- **Detekcja ultradźwiękowa** - Energia akustyczna jest wysyłana przez przetwornik nadajnika. Następnie energia rozchodzi się po taśmie, wykorzystując gumową i stalową matrycę jako medium transmisyjne. Energia jest wykrywana przez szereg przetworników odbiorczych, umieszczonych w różnych pozycjach na taśmie. W przypadku rozerwania taśmy poziom energii akustycznej docierającej do odbiornika jest albo zmniejszony, albo całkowicie utracony. Przykładowy producent BeltScan [19].
- **Laserowa detekcja stanu taśmy** - Wiązka lasera uderza w powierzchnię strony nośnej pasa, zanim zostanie odbita i uchwycona przez kamerę. Pasek laserowy jest stale analizowany za pomocą triangulacji, aby określić szerokość i głębokość rozdarcia lub uszkodzenia taśmy. Oprogramowanie generuje obraz 3D, który przedstawia wszelkie rozdarcia, które mogły wystąpić. W przypadku zerwania taśmy przenośnik zostanie automatycznie wyłączony. Przykładowy producent BeltScan [19] lub Contitech [17].
- **Detekcja stanu taśmy za pomocą promieniowania rentgenowskiego** – Promieniowanie zostaje przepuszczone przez monitorowaną taśmę. W zależności od właściwości absorpcyjnych materiału, część promieniowania jest pochłaniana. Niezaabsorbowany składnik promieniowania jest wychwytywany przez detektory i przekształcany na sygnały elektryczne. Te sygnały elektryczne są oceniane przez komputer i przedstawiane graficznie. Przykładowy producent Contitech [17].
- **Monitorowanie rozdarć na miejscach łączenia taśmy za pomocą czujników magnetycznych** – są w stanie wykryć niepożądane wydłużenie taśmy. Przykładowy producent Contitech [17].

Powyższe zestawienie stanowi tylko wycinek dostępnych metod monitorowania stanu taśmy, wynika jednak z jego jednoznacznie, że obszar ten jest pokryty bardzo dobrze. W

obszarze istniejących rozwiązań były też prowadzone badania naukowe. Fedorko [20] przeprowadził badania zużycia pasa na przenośnikach rurowych z zastosowaniem tomografii komputerowej. Użycie promieni rentgenowskich proponowali także Guan i Zhang [21]. Leite natomiast zaproponował użycie lasera 2D oraz metod statystycznych w celu wykrycia przedarcia podłużnych [22]. Wang natomiast zaproponował metody wykrywania uszkodzeń za pomocą fal dźwiękowych [23]. Valis zaproponował inne podejście tj. diagnostykę za pomocą pomiaru odległości punktów kontrolnych [24]. W badaniach podnoszono również możliwość użycia wewnętrznych detektorów przewodności [25] i analizy spectrum podczerwień [26]. Jednakże w większości badacze koncentrują się na zastosowaniu nowoczesnych technik komputerowych tj. Wizja komputerowa oraz głębokie uczenie. Zhang [27] zaproponował użycie sieci Yolo w wersji 5 do oceny stanu pasa i wykrywania niepożądanych obiektów na taśmie transportowej. Chamorro [28] przebadał użycie wizji w połączeniu z danymi pomiarowymi w celu detekcji. Hou [29] badał wykrywanie rozdarć podłużnych za pomocą multispectralnej detekcji wizualnej. Che [30] badał łącznie metod wizyjnych z analizą dźwięków również w celu detekcji rozdarć podłużnych. Zhang [27][31] zaproponował użycie głębokiego uczenia w celu oceny stanu taśmy. Andrejiova [32] natomiast zaproponowała użycie uczenia maszynowego również w celu oceny stanu taśmy.

Z powyższego opisu wynika, iż stopień pokrycia monitorowania stanu pasa zarówno od strony dostarczanych przez producentów rozwiązań i od strony badań naukowych jest bardzo duży. Jednakże w badaniach i w rozwiązaniach dostarczanych przez producentów brakuje rozwiązań pozwalających ocenić zachowanie się pasa podczas pracy, a w szczególności zapobieganie niepożądanym zjawiskom takim jak obrót czy zsuniecie. W obszarze przenośników rurowych Fedorko [33] zaproponował metody wykrywania przesunięcia taśmy za pomocą zamontowanych czujników, jednakże charakterystyka badanych przez niego przenośników jest odmienna od obszaru zainteresowania pracy. Na rynku występują co prawda proste urządzenia pozwalające wykryć, iż taśma się zsuwa jednak jest to jedynie powiadomienie o problemie a nie jest to mechanizm, który pozwala mu zapobiec.

1.2. Monitorowanie krążników

Monitorowanie stanu krążników jest niezmiernie istotną kwestią, ponieważ krytyczne awarie mogą doprowadzić do zatrzymania przenośnika, a w niektórych przypadkach nawet do pożaru, oraz jednocześnie wymagać długotrwałej naprawy. Dodatkowo krążniki są elementami, które w przypadku przenośników relatywnie jest kontrolować najtrudniej. Wynika to z faktu rozmieszczenia krążników na całej długości przenośnika, a przez to system monitorujący musiałby być rozmieszczony na całej długości przenośnika, co stanowi wyzwanie zarówno konstrukcyjne, ale co bardziej istotne, wyzwaniem jest również zapewnienie ciągłości działania takiego systemu. Kolejnym elementem wpływającym na złożoność problemu jest fakt, iż krążniki w znacznej ilości przypadków nie są chronione przed wpływem

środowiska zewnętrznego, a co za tym idzie system monitorujący musi być również odporny na działanie zjawisk atmosferycznych.

Na podstawie badań przeprowadzonych przez Vasic [34] wynika, iż ponad 80% wszystkich awarii występujących na krążnikach przenośnika, na które oddziałuje środowisko zewnętrzne, wynika z odkształceń plastycznych i korozji. Dodatkowo ponad 70% procent awarii dotyczyło krążników bocznych na które oddziałują siły zarówno równoległe jak i prostopadłe do osi pracy. Dlatego niezmiernie ważne jest w analizach uwzględnienie rozmieszczenia krążników i sił na nie oddziałujących.

Badania naukowe dotyczące stanu krążników koncentrują się głównie na diagnostyce na podstawie wibracji, emisji fal dźwiękowych i temperatury. Morales [35] i Liu [36] przeanalizowali dostępne metody i pogrupował je pod kątem możliwości zastosowania. W ramach analiz przeprowadził również podsumowanie dostarczenieli odpowiednich technologii. Natomiast Y.Liu [37]przeprowadził analizy porównawcze dwóch z w/w metod tj. pomiary temperatury i dźwięku mające na celu sprawdzenie, która z metod pozwala na wykrycie różnych typów awarii. Uszkodzenia były badane pod kątem przyczyny tj. zmęczenie, zużycie, korazja, zabrudzenia i pęknięcia oraz pod kątem wpływu na pracę łożyska tzn. od uszkodzeń niewielkich po krytyczne. Główne wnioski płynące z badań to, że pojedynczy typ pomiarów zwiększa ryzyko nie wykrycia awarii oraz iż w większości przypadków znaczny wzrost temperatury oznacza poważną awarię. Wnioski te potwierdził w swoich badaniach X. Liu [36] wskazując, iż pomiar temperatury jest tanim i prostym sposobem diagnostyki krążników, jednakże pozwalający w większości przypadków wykryć jedynie poważną awarię. Jiang [38] przeprowadził analizy pomiaru natężenia dźwięku i wykrywania awarii za pomocą technik głębokiego uczenia. Fiset przeprowadził również badania procesu zużycia okładzin krążników [39] jednakże w przypadku badanych przenośników takie awarie występowały marginalnie. Niektórzy badacze proponują też inne podejścia do wykrywania awarii krążników np. pomiar prędkości obrotowej krążników [40], jednakże w tym przypadku badania zostały przeprowadzone dla płaskiego przenośnika i pracującego bez obciążenia, czyli dla przypadku innego niż dla transportu materiałów sypki.

Ponieważ jak zostało przedstawione przenośniki taśmowe są obiektami dużymi i rozciągniętymi na znacznej przestrzeni badania odnośnie do metod monitorowania koncentrują się również na sposobach wykonywania pomiarów wibracji, emisji dźwięku i temperatury. Wśród badań odminują podejścia odnośnie do robotów inspekcyjnych oraz kabli światłowodowych. Faria [41] prowadził badania w obszarze robota pozwalającego na pomiary termowizyjne oraz pomiary natężenia dźwięku. Dąbek [40] w swoich analizach natomiast proponuje zastosowania robota inspekcyjnego pozwalającego na zastosowanie technik wizji komputerowej. Skoczylas [38] przeprowadził natomiast analizy zastosowania robot inspekcyjnego w celu pomiarów sygnałów akustycznych. Jego badania zostały przeprowadzone na rzeczywistym obiekcie należącym do jednego z największych na świecie producentów miedzi. Kolejnym obszarem, w którym trwają intensywne badania jest

technologia wykrywania awarii za pomocą kabli światłowodowych. Największą zaletą takiego rozwiązania jest możliwość opomiarowania obiektów posiadających znaczną długość tj. np. przenośniki. Wadą natomiast jest ograniczenie zakresu pomiarów oraz podatność na zakłócenia. Wijaya [42] zaproponował użycie kabli światłowodowych do monitorowania instalacji rozciągniętych na znacznych obszarach. Następnie również Wijaya [43] przebadał ich zastosowanie do przenośników taśmowych, badanie te również zostały podjęte przez Pan [44]. W obu przypadkach proponowane rozwiązania zostały uznane za skuteczne.

1.3. Cel i zakres pracy

Praca koncentruje się na przenośnikach taśmowych o znacznych rozmiarach transportujących materiały sypkie. Analizowane przenośniki posiadają skomplikowaną geometrię, na którą składają się zmiany wysokości oraz łuki zarówno poziome jak i pionowe. W ramach badań analizowano przenośnik zlokalizowany w terenie górzysty w Chinach. Badany przenośnik posiada znaczną długość i liczne wzniesienia i zakręty. Badany przenośnik został opisany w punkcie 3.

Zakres pracy łączy w sobie zagadnienia z wielu dziedzin tj. Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki, Informatyki, Inżynierii Lądowej czy Mechaniki. Głównym celem pracy było stworzenie narzędzi służących do wspomaganie monitorowania przenośników taśmowych. Aby zrealizować ten cel stworzono model geometrii przenośnika, a następnie stworzono narzędzia do projektowania przenośnika oraz przechowywania informacji o jego geometrii. Kwestie te zostały opisane w rozdziale 5. Następnie, na podstawie literatury naukowej i wiedzy będącej w posiadaniu firmy BEUMER, opracowano obliczenia analityczne pozwalające na wyznaczanie sił, oporów oraz naprężeń występujących w przenośnikach taśmowych. Zastosowane metody i procedury zostały opisane w rozdziale 6. W rozdziale 7 opisano metody dopasowania parametrów obliczeń analitycznych do rzeczywistych instalacji, tak aby było możliwe symulowanie zachowania się przenośników taśmowych. Następnie przeprowadzono badania istniejących przenośników i zaproponowano narzędzia pozwalające na aplikację modeli uczenia maszynowego oraz stworzono szereg metod pozwalających na wykrywanie awarii. Wszystkie tematy związane z obszarem przewidywania awarii opisano w punkcie 10.

Praca w swojej treści skupia się na narzędziach służących przede wszystkim na przewidywaniu awarii a co za tym idzie optymalizacji pracy przenośnika natomiast tylko wzmiankuje o tworzeniu modeli, obliczeń czy architektury systemów informatycznych. Tematy te choć niezwykle istotne dla pracy mogłyby przez swoją objętość doprowadzić do nadmiernego rozrostu pracy i ukryłyby główne tematy związane z utrzymaniem taśmociągu. Dodatkowo, ponieważ praca powstała w ramach programu doktoratu wdrożeniowego i prowadzona była we współpracy z firmą BEUMER wyzwaniem było opisanie tematów w taki sposób, aby nie naruszać własności intelektualnej i tajemnicy przedsiębiorstwa. Niemniej

jednak praca opisuje przeprowadzone prace w taki sposób, aby dać obraz całości wysiłków, przeprowadzonych badań oraz użytego podejścia.

Na podstawie badań potrzeb przeprowadzonych wewnątrz przedsiębiorstwa wyszczególniono trzy obszary, które mogą wymagać poprawy diagnostyki w celu polepszenia możliwości utrzymania taśmociągu. Trzy zdefiniowane obszary to:

- diagnostyka taśmy transmisyjnego,
- diagnostyka krążników przenośnika,
- diagnostyka napędu wraz z kołami pasowymi.

W pracy natomiast nie badano diagnostyki konstrukcji przenośnika tj. mostów i podpór, elementów dodatkowych przenośnika oraz konstrukcji odbioru i podawania. Elementy te nie były badane z dwóch powodów: w pracy skupiono się ściśle na transporcie materiału oraz elementy te albo są bardzo proste lub posiadają obecnie diagnostykę na zadowalającym poziomie

Praca w swoim charakterze porusza się zgodnie z wytycznymi Przemysłu 4.0. Używa nowoczesnych technik komputerowych takich jak rozproszona architektura, Internet Rzeczy, przetwarzanie wielowątkowe czy uczenie maszynowe.

W ramach wspomaganie monitorowania przenośnika praca wprowadza innowacyjne metody przewidywania ryzyka obrotu pasa (punkt 10.2), zsunienia się pasa (punkt 10.3) oraz wprowadza innowacyjny algorytm podejmowania decyzji odnośnie do serwisu krążników przenośnika (punkt 10.4). Czynniki wpływające na zaproponowanie rozwiązań w tych obszarach zostały opisane wcześniej w podrozdziałach tj. 1.1 oraz 1.2.

Praca opiera się na założeniu, iż istnieje możliwość stworzenia modelu geometrycznego przenośnika, takie dzięki któremu będzie możliwe zamodelowanie zjawisk występujących na przenośniku, a dzięki temu ostatecznie stworzeniu cyfrowego bliźniaka.

2. Przemysł 4.0

Idea przemysłu 4.0 powstała wraz ze wzrostem możliwości systemów informatycznych. Liczba 4.0 ma za zadanie symbolizować czwartą rewolucję przemysłową. Pierwsza rewolucja przemysłowa została zapoczątkowana w Wielkiej Brytanii w XVIII wieku i związana jest z wprowadzeniem pierwszych maszyn w tym maszyn parowych. Druga rewolucja przypada na okres przełomu XIX i XX wieku i związana jest z wprowadzeniem produkcji masowej oraz upowszechnieniu wykorzystania energii elektrycznej, oraz węglowodorów w postaci ropy oraz gazu. Na trzecią rewolucję, która wystąpiła w połowie XX wieku natomiast składa się komputeryzacja oraz automatyzacja produkcji. Obecnie w związku z rozwojem technologii informatycznych uważa się, że jesteśmy podczas czwartej rewolucji.

Przemysł 4.0 to w gruncie rzeczy zbiór różnych technologii, których wspólnym celem jest zwiększeniem automatyzacji poprzez wprowadzenie inteligentnych maszyn, a nawet całych fabryk. Opomiarowanie urządzeń, robotyzacja, szeroki dostęp do danych oraz wprowadzenie zaawansowanych technologii informatycznych w tym sztucznej inteligencji zwiększają elastyczność, redukują pracochłonność i wspomagają podejmowanie decyzji. Wśród używanych technologii i podjęć zdecydowanie można wyróżnić Internet Rzeczy (ang. Internet of Things), cyfrowy bliźniak czy systemy ekspertowe i sztuczna inteligencja. Ponieważ koncepcja Przemysłu 4.0 wymaga gromadzenia, przetwarzania i dystrybuowania znacznych ilości danych niezbędne są techniki pozwalające takie operacje wykonywać. Jedną z nich jest Internet Rzeczy czyli koncepcja zgodnie z którą różnego rodzaju elementy mogą gromadzić, przetwarzać i wymieniać się danymi. W pracy podejście to zostało wykorzystane i opisane w punkcie dotyczącym zbierania danych (punkt 4). Kolejną z podjęć to Cyfrowy bliźniak opisany w punkcie 2.1.

2.1. Cyfrowy bliźniak

Cyfrowy bliźniak (ang, digital twin) jest cyfrową kopią istniejącego obiektu przemysłowego. Innymi słowy celem istnienia cyfrowego bliźniaka jest odwzorowanie i połączenie fizycznego obiektu z jego cyfrową interpretacją, tak aby umożliwić modelowanie wszystkich aspektów związanych z fizycznym obiektem. Cyfrowa kopia danego obiektu może znaleźć zastosowanie podczas:

- Monitorowania urządzenia – może być używany jako narzędzie kontroli poprawności procesów.
- Utrzymania urządzenia – znajduje zastosowanie jako narzędzie pozwalające planować prace konserwacyjne i oceniać stan instalacji, a także umożliwiające przewidywanie awarii.
- Projektowanie urządzenia – może również znaleźć zastosowanie podczas projektowania jako cyfrowy model urządzenia pozwalający na przeprowadzenie odpowiednich testów przed fizyczną budową.

Ponieważ cyfrowy bliźniak nie jest ściśle zdefiniowaną technologią, a raczej wytyczną postępowania w badaniach poświęca się wiele czasu na poszukiwanie rozwiązań możliwych do zastosowania w wielu gałęziach przemysłu w tym również w obszarze transportu materiałów sypkich.

2.2. Profilaktyka awarii

Profilaktyka awarii (ang. Predictive maintenance) jest jedną ze składowych idei przemysłu 4.0. Celem profilaktyki jest zapobieganie sytuacji niepożądanym poprzez przewidywanie awarii i wyznaczanie niezbędnych czynności serwisowych. Poprzez profilaktykę awarii rozumie się wykorzystanie narzędzi statystycznych i uczenia maszynowego tj. regresja, analiza danych, wyznaczanie trendów, poszukiwanie wzorców i korelacji a następnie wykorzystanie zebranych i zagregowanych danych w algorytmach pozwalających na podejmowanie decyzji [45].

W obszarze przenośników taśmowych występuje znaczna ilość badań skupiających się na analizach wybranych obszarów funkcjonowania taśmociągów. Skoczylas [46] i Stefaniak [47] zaproponowali koncepcję systemów służących do monitorowania i podejmowania decyzji. Huanzhong Wang [48] opracował koncepcję modelu symulacyjnego mającego za zadanie oszacować niezawodność pracy przenośnika w podziemnej kopalni węgla. W ramach badań na utrzymaniu silników przenośnika zaproponowano użycie neuronowej sieci konwolucyjnej [49]. Natomiast Shasa Wang [50] prowadził analizy możliwości zbudowania systemu monitoringu w oparciu o procesory w architekturze ARM. Badania w obszarze napędów przenośników przeprowadził również Sonia [51] postulując wprowadzenie systemu ekspertowego. Yang [52] zaproponował model pozwalający na modelowanie energii dla badanych silników. Badania w obszarze napędów, uwzględniające również możliwości aplikacji w rzeczywistym obiekcie, przeprowadził również Yuan [53]. Natomiast w ramach badań nad przenośnikami rurowymi zaproponowano wykorzystanie systemu ekspertowego [3][4] w celu monitorowania wybranych parametrów pracy. Część badaczy skupia się natomiast aspektach ekonomicznych pracy przenośnika [54][55] oraz proponowano algorytmy optymalizacyjne [56][57] uwzględniające czas pracy elementów. Badacze podejmowali również badania w obszarze obsługi krążników. Szacowano czas ich pracy za pomocą uczenia maszynowego z użyciem algorytmu Support Vector Regressions [58]. Liu [59] przedstawił ideę algorytmu wspomagającego decyzję.

Przy próbie implementacji algorytmu zaproponowanego przez Liu [59] wystąpiły problemy, które nie zostały rozwiązane w/w badaniach. Na przykład Liu proponuje pomiar wyłącznie temperatury co w świetle doświadczeń operacyjnych oraz pozostałych badań naukowych (min. [60][35]), a także doświadczeń z 16 letnią obsługą urządzenia jest daleko niewystarczające. Co więcej oparcie się wyłącznie na arbitralnej granicy temperatury jest niemożliwe do wdrożenia ze względu na zmiany temperatury otoczenia, a co za tym idzie

temperatury łożysk. Dodatkowo proponowana metoda nie zawiera możliwości dopasowania teoretycznego modelu do rzeczywistych parametrów i doświadczeń operacyjnych, a w zamian proponuje arbitralną funkcję błędów generującą nieprawidłowe wyniki. Kolejną kwestią jest brak możliwości uwzględniania krążników o różnej charakterystyce i różnym czasie montażu. Na długość działania łożysk tocznych znajdujących się w krążnikach przenośnika mają wpływ zarówno warunki zewnętrzne otoczenia (temperatura, wilgotność czy zapylenie powietrza) jak również parametry związane z pracą przenośnika. Do tych parametrów można zaliczyć prędkość obrotowa będąca funkcją liniową prędkości transportowej oraz siły działające na krążnik a w konsekwencji również na łożyska. W pracy uzupełniono wyżej wymienione braki. Zaproponowano innowacyjny sposób postępowania, który jest możliwy do zaadoptowania w dowolnym przenośniku taśmowym. Dodatkowo proponowane metody zostały rozwinięte o wyznaczenie przesunięcia taśmy na łukach. Na potrzeby badań przeprowadzono pomiary na unikatowym przenośniku taśmowym znajdującym się w górzystym terenie w Chinach, którego łączna długość wynosi 12461m. Należy podkreślić, że badania i metody zawarte w artykule uzupełnią ideę "cyfrowego bliźniaka" w obszarze przenośników taśmowych [61].

Założenia obliczeń sił występujących na przenośniku wraz z siłami oddziaływującymi na krążniki przenośnika opracował Hettler [62], Grimmer [63] oraz Gładysiewicz [64]. Limberg [65] i Greune [66] zdefiniowali natomiast metody wyznaczania naprężenia taśmy, dzięki którym możliwe jest oszacowanie przemieszczenia się taśmy na łukach. Wyznaczenie sił oddziaływujących na poszczególne elementy przenośników jest tematem bardzo złożonym. W związku z powyższym jest to tematem badań wielu naukowców. Badany był wpływ naprężenia taśmy na nacisk na krążniki [67] oraz analizowany rozkład sił kontaktowych pomiędzy pasem a krążnikami [68].

Powstało również szereg badań naukowych proponując modele pozwalające na symulowanie pracy przenośnika taśmowego. Chen [69] i Yang [70] zaproponowali metody redukcyjne pozwalające rozwiązać problem zjawisk występujących na przenośniku. Jednakże w/w metody nie pozwalały na wystarczająco dokładne odwzorowanie modelu przenośnika o skomplikowanej geometrii i znacznej długości, dlatego w pracy oparto się na własnym modelu pozwalającym wyznaczyć siły i naprężenia w każdym miejscu badanej instalacji.

3. Opis badanego przenośnika

Przedstawione w pracy badania dotyczą przenośnika zbudowanego w 2008 roku zlokalizowanego w regionie Syczuan w Chinach. Przenośnik ten posiada długość całkowitą wynoszącą 12461 metrów, a jego przepustowość wynosi 2400 ton wapienia na godzinę. Poprowadzony jest w terenie górzystym, przez rezerwat przyrody. Z powodu ukształtowania terenu przenośnik w wielu miejscach wznosi się i opada oraz posiada liczne zakręty. Przenośnik służy do zaopatrywania w wapień miejscową cementownię. Badany przenośnik został wybudowany w celu zastąpienia transporty kołowego, będącego znacznym obciążeniem dla środowiska. Dodatkowo ze względu na wymagania środowiskowe część przenośnika wyposażona jest obecnie w krążniki o zredukowanym poziomie emisji hałasu.

Ponieważ geometria taśmociągu jest skomplikowana tzn. zawiera liczne zakręty i wzniesienia (rys. 3.1), geometria przenośnika do celów analitycznych została podzielona na 61 sekcje. Sekcje przenośnika zaprezentowane zostały w tabeli nr 3.1. Dobór sekcji odbywał się z uwzględnieniem parametrów trasy tj. wartość nachylenia trasy oraz występowanie łuków zarówno pionowych jak i poziomych. W obliczeniach założono również, iż materiał i taśma przenośnika różnie się zachowuje w przypadkach zmian geometrii. Fakt ten został uwzględniony podczas projektowania przenośnika poprzez zmianę geometrii statywów, jak też podczas badania zachowania przenośnika w warunkach pracy pod obciążeniem jak i bez niego.

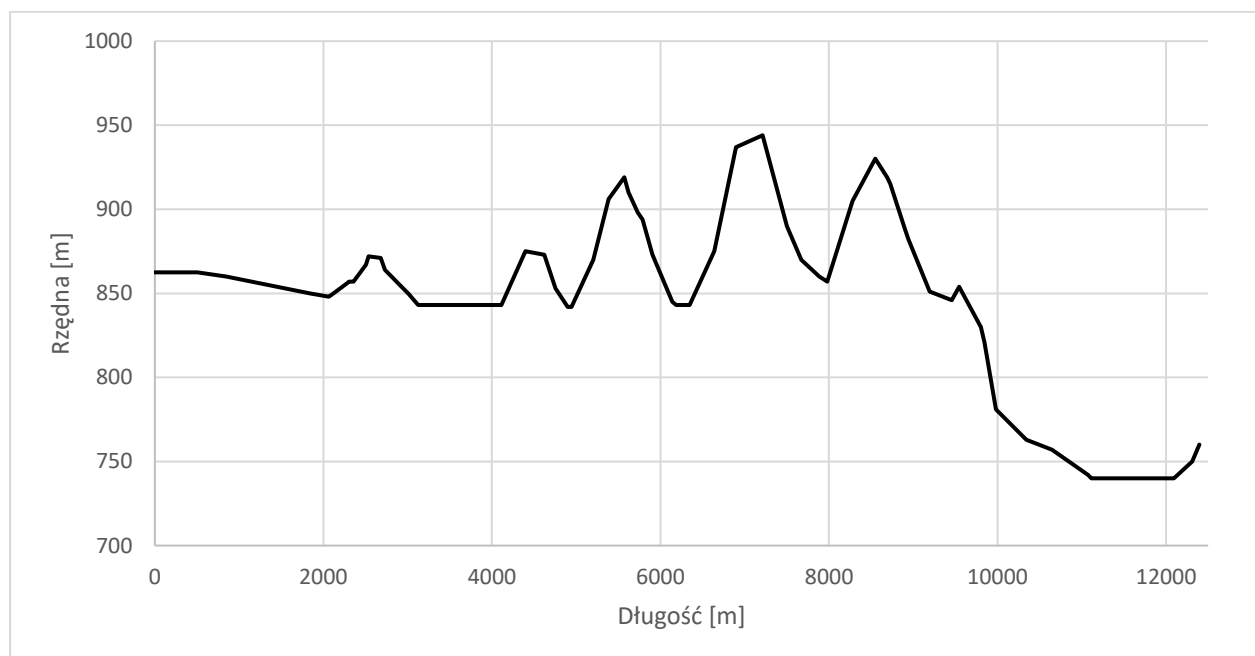
Numer sekcji	rzędnej wysokościowej	Długość sekcji	Rzędna końca sekcji	Średnica łuku horyzontalnego	Średnica łuku wertykalnego
-	m	m	m	m	m
1	0,00	495,5	862,50	0,00	0,00
2	0,00	9,1	862,50	0,00	1000,00
3	-2,50	341,5	860,00	0,00	0,00
4	-10,00	1000,00	850,00	3000,00	0,00
5	-2,00	219,70	848,00	1000,00	0,00
6	2,00	51,50	850,00	1000,00	-1000,00
7	6,00	163,80	856,00	1000,00	0,00
8	1,00	21,20	857,00	1000,00	500,00
9	0,00	56,80	857,00	1000,00	0,00
10	10,00	144,90	867,00	1000,00	-1000,00
11	5,00	30,10	872,00	1000,00	0,00
12	-1,00	146,80	871,00	1000,00	500,00
13	-7,00	50,10	864,00	1000,00	0,00

14	-10,00	194,70	854,00	1000,00	-1000,00
15	-4,00	80,50	850,00	1000,00	500,00
16	-7,00	116,90	843,00	1000,00	-1000,00
17	0,00	160,20	843,00	1000,00	0,00
18	0,00	829,20	843,00	0,00	0,00
19	32,00	284,40	875,00	0,00	-1250,00
20	-2,00	226,30	873,00	0,00	500,00
21	-20,00	130,00	853,00	0,00	-1250,00
22	-11,00	144,70	842,00	5000,00	-1250,00
23	0,00	47,80	842,00	5000,00	0,00
24	28,00	257,60	870,00	5000,00	-1250,00
25	36,00	181,50	906,00	5000,00	0,00
26	13,00	185,47	919,00	5000,00	750,00
27	-9,00	50,00	910,00	0,00	750,00
28	-12,00	111,40	898,00	0,00	-1250,00
29	-4,00	56,50	894,00	0,00	0,00
30	-21,00	116,20	873,00	0,00	750,00
31	-28,00	236,70	845,00	0,00	-1250,00
32	-2,00	45,00	843,00	2000,00	-1250,00
33	0,00	161,40	843,00	2000,00	0,00
34	32,00	292,90	875,00	2000,00	-1250,00
35	51,00	211,70	926,00	2000,00	0,00
36	11,00	45,00	937,00	1500,00	0,00
37	7,00	315,50	944,00	1500,00	750,00
38	-54,00	288,90	890,00	1500,00	0,00
39	-20,00	170,30	870,00	1500,00	-1250,00
40	-10,00	212,40	860,00	1500,00	0,00
41	-3,00	96,20	857,00	1500,00	-1250,00
42	48,00	299,30	905,00	2000,00	-1250,00
43	25,00	269,90	930,00	2000,00	750,00
44	-11,00	140,30	919,00	2000,00	0,00
45	-4,00	40,00	915,00	2000,00	750,00
46	-27,00	171,90	888,00	1500,00	0,00
47	-6,00	42,88	882,00	1500,00	-1250,00

48	-31,00	250,00	851,00	1500,00	0,00
49	-5,00	262,30	846,00	1500,00	-1250,00
50	8,00	89,40	854,00	1500,00	0,00
51	-24,00	257,90	830,00	1500,00	750,00
52	-9,00	39,00	821,00	1500,00	0,00
53	-40,00	139,00	781,00	1500,00	-1250,00
54	-18,00	359,00	763,00	1500,00	0,00
55	-6,00	307,00	757,00	0,00	0,00
56	-15,00	426,50	742,00	2000,00	0,00
57	-2,00	37,70	740,00	2000,00	-1250,00
58	0,00	194,00	740,00	2000,00	0,00
59	0,00	787,00	740,00	0,00	0,00
60	10,00	217,80	750,00	0,00	-1500,00
61	10,00	84,70	760,00	0,00	0,00

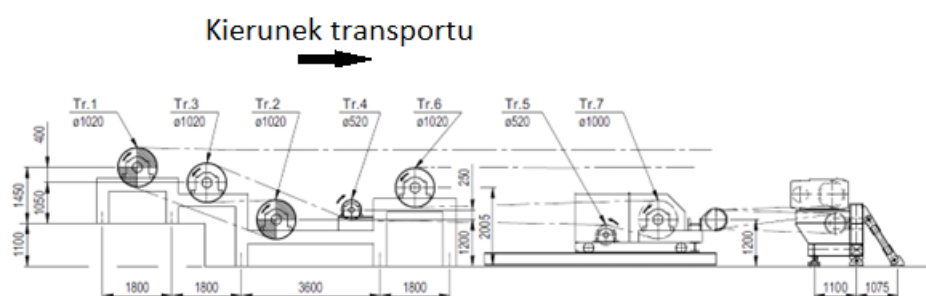
Tabela 3.1 Sekcje badanego przenośnika

Zobrazowanie zmian rzędnej wysokościowej elementów przenośnika zostało zaprezentowane na rysunku nr 3.1.

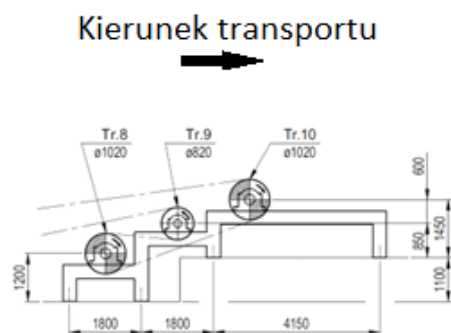


Rysunek 3.1 Geometria trasy taśmociągu

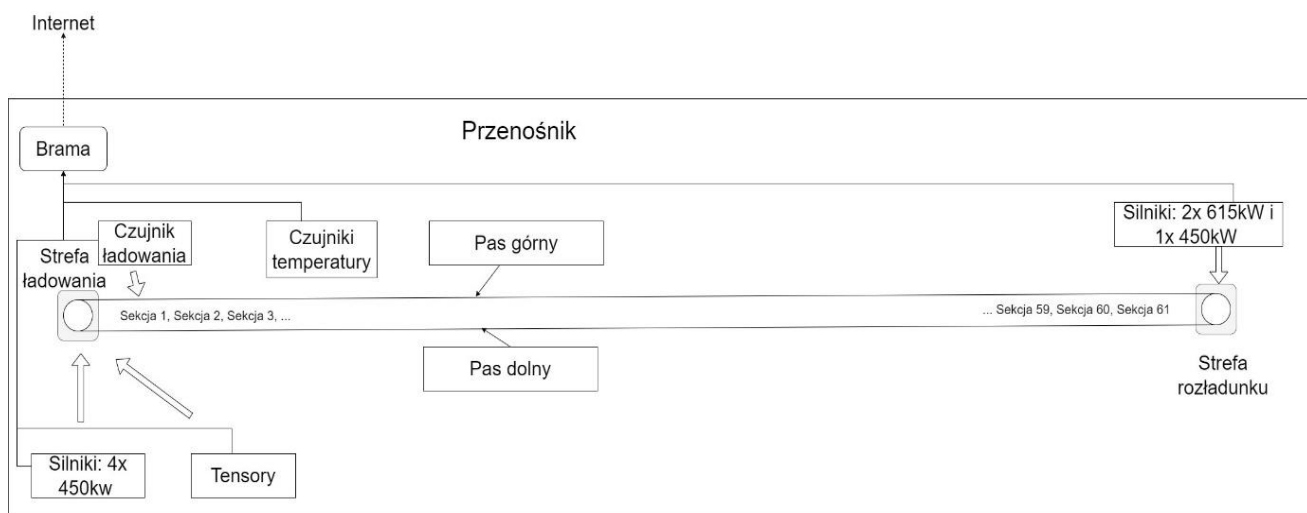
Taśma badanego przenośnika wprowadzana jest w ruch poprzez zestaw silników elektrycznych umieszczonych na początku (rys. 3.2) i na końcu przenośnika (rys. 3.3). Na początku przenośnika zamontowano cztery silniki o mocy 450kW każdy, natomiast na końcu trzy silniki o mocy 615kW każdy oraz jeden o mocy 450kW. Ilość transportowanego materiału mierzona jest za pomocą wagi taśmowej Micro-Tch 2000. Naprężenie taśmy mierzone jest za pomocą połączonych równolegle tensometrów przyłączonych do MP30 poprzez terminala VKK. Temperatura mierzona jest za pomocą SOC-T1. Całość danych pomiarowych przesyłana jest do bazy danych, za pomocą sieci Internet, zapewniającej dostęp do danych aktualnych i historycznych (punkt 4). Schemat opomiarowania zaprezentowany jest na rysunku nr 3.4.



Rysunek 3.2 Rozmieszczenie silników i kół pasowych na początku przenośnika



Rysunek 3.3 Rozmieszczenie silników i kół pasowych na końcu przenośnika



Rysunek 3.4 Schematyczny opis badanego przenośnika



Rysunek 3.5 Widok fragmentu badanego przenośnika [rr1]

Przenośnik został zaprojektowany, aby przenosić znaczne ilości materiałów w możliwie najkrótszym czasie. Prędkość transportowa wynosi 5 m/s, a więc przetransportowanie materiału z jednego końca przenośnika na drugi zajmuje ponad 41 minut. Jednocześnie całkowita masa materiału umieszczona na przenośniku może wynosić prawie 1700 ton. Podstawowe parametry pracy przenośnika zostały przedstawione w tabeli nr 3.2.

Prędkość transportu	5 m/s
Przepustowość	2400 t/h
Odstęp pomiędzy statywami z krążnikami	1.5 m
Długość przenośnika	12461 m
Całkowita moc silników	3480 kW
Szerokość taśmy	1.2m

Tabela 3.2 Główne parametry przenośnika

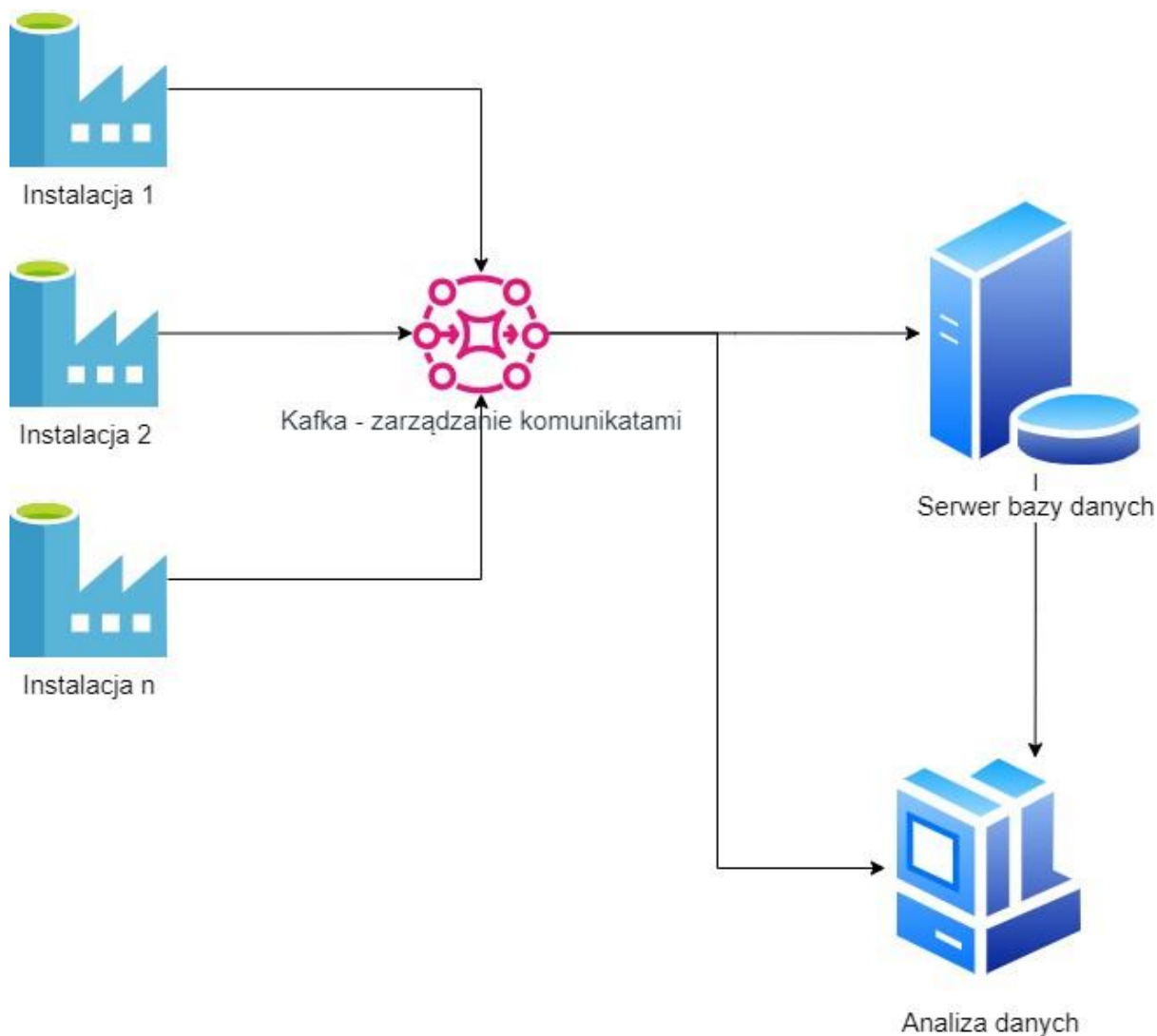
Ze względu na znaczne obciążenia proces uruchamiania i napełniania przenośnika materiałem został podzielony na 3 fazy. W pierwszej kolejności przenośnik jest uruchamiany w normalnym trybie bez obciążenia. Po ustabilizowaniu zaczyna się ładowanie przenośnika z 50% wydajnością, okres ten trwa około 20 minut. Po upływie tego czasu zaczyna się ładowanie z wydajnością 100%. Z powyższych parametrów wynika, iż wypełnienie materiałem przenośnika w 100% wykonywane jest w czasie 1h.

Wszystkie powyższe parametry mają odzwierciedlenie w prowadzonych badaniach.

4. Zbieranie danych

Podstawą działania systemów monitoring jest możliwość dostępu do danych z czujników umieszczonych na instalacjach przenośników taśmowych. Aby zapewnić możliwość działania takich systemów należy w sposób systemowy zapewnić dostęp zarówno do danych historycznych jak i aktualnych. Dlatego też głównym zadaniem systemu zbierania danych to komunikacja z czujnikami umieszczonymi na przenośniku w celu dostarczenia wartości danych pomiarowych w czasie rzeczywistym, a także ich zbieranie i agregacja.

Dostęp do danych w czasie rzeczywistym wykorzystywany jest do analizowania parametrów pracy oraz do wykrywania sytuacji, w których powinien być raportowany alarm. Dane prezentowane w czasie rzeczywistym nie dają natomiast informacji o trendach występujących podczas pracy oraz nie pozwalają na analizę pracy przenośnika w dłuższym okresie. Aby umożliwić zrealizowanie w/w zadań niezbędne jest wykorzystanie systemu pozwalającego na zbieranie i agregowanie danych.



Rysunek 4.1 Schemat systemu zbierania danych.

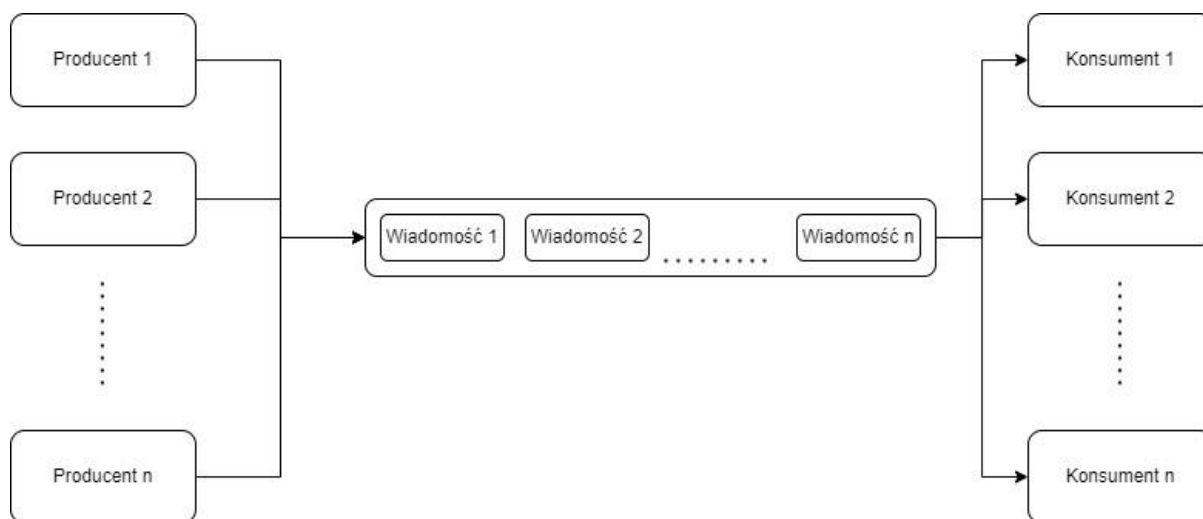
W celu zapewnienia przedstawionych zadań użyto architektury opisanej na schematycznym rysunku nr 4.1. Instalacje przenośników odpowiedzialne są za połączenie się z systemem centralnym w celu przekazania danych z czujników. Po stronie poszczególnych instalacji pracują systemy w oparciu o technologię Internetu Rzeczy (ang. IoT), które przekazują swoje dane za pomocą sieci Internet, natomiast po stronie systemu centralnego występuje system rozdziału wiadomości zaimplementowany za pomocą narzędzia Apache Kafka, opisanym w punkcie 4.1, oraz system baz danych, opisany w punkcie 4.2. Całością spinającą jest system analizy danych dostarczanych w czasie rzeczywistym oraz danych historycznych.

Na dane przesyłane z instalacji składają się wartości pomiarowe oraz alarmy dotyczące występujących zdarzeń. Zbiór danych pomiarowych przesyłanych z instalacji znajduje się w załączniku nr 3.

4.1. Zarządzanie danymi przesyłanymi z instalacji

Zarządzanie danymi wykonywane jest za pomocą aplikacji Apache Kafka [71]. System ten jest rozproszoną platformą do przesyłania komunikatów za pomocą strumieni. Dzięki dużej wydajności takiego rozwiązania może ona znaleźć rozwiązanie w systemach czasu rzeczywistego. Jednym z rekomendowanych przypadków użycia tego systemu jest zbieranie danych z czujników i następnie ich analizowanie. Dzięki temu rozwiązanie to doskonale się wpisuje w ideę Internetu Rzeczy.

Apache Kafka opiera się na koncepcji producentów, brokera i konsumentów. Rolę producentów pełnią systemy typu Internet Rzeczy zintegrowane i umieszczone w pobliżu instalacji przenośników. Rolę konsumentów pełni system z centralnie umieszczoną bazą danych Elasticsearch (punkt 4.2.) oraz pozostałe systemy analizujące wartości danych pomiarowych. Działanie konsumentów opiera się na zasadzie subskrypcji do konkretnej kolejki wiadomości. Wewnątrz systemu Kafka wiadomości przechowywane są jako serializowane dane, natomiast konsumenci odpowiedzialni są za ich deserializację do postaci rozumianej przez konkretną aplikację. Przekazywane dane mogą mieć dowolny format przy czym obecnie dominującym jest JSON. Wewnątrz systemu Kafka wiadomości przechowywane są w tematach które mogą posiadać dowolną listę konsumentów i producentów. Schematyczne działanie systemu zostało przedstawione na rysunku nr 4.2.



Rysunek 4.2 Schemat działania kolejki Apache Kafka

4.2. Zbieranie i agregacja danych

Wiadomości za pomocą konektorów przesyłane są do systemu Elasticsearch [72]. W tym przypadku system ten pełni rolę konsumenta. Sam Elasticsearch jest rozproszonym silnikiem wyszukiwania oraz bazą danych. Jest on wzbogacony o język zapytań DSL (punkt 4.2.1.) oraz REST API umożliwiające wykonywanie zapytań poprzez protokół http. Elasticsearch jest bardzo skalowalnym systemem, opiera się on na węzłach połączonych w klastry, dzięki czemu w posiada znaczne możliwości zwiększenia ilości przechowywanych danych oraz prędkości przetwarzania. Z punktu widzenia organizacji wewnętrznej danych podstawową jednostką organizacyjną jest indeks będący kolekcją dokumentów o podobnej charakterystyce. Dodatkowym elementem jest interfejs graficzny Kibana [73] służący do podstawowej prezentacji i analizy danych (punkt 4.2.2.).

4.2.1. Język zapytań DSL

Zapytanie Elasticsearch DSL [74] jest wewnętrznym językiem systemu służącym do generowania przeszukiwań i agregacji za pomocą interfejsu REST API. W rezultacie możliwe jest z poziomu pozostałych aplikacji korzystanie z zasobów bazy oraz generowanie raportów lub podstawowych obliczeń zgodnie z potrzebami danej aplikacji. W kontekście przonośników zapytania używane są np. w celu pobrania historycznych wartości czujników oraz

generowaniu wartości średnich bądź szukania ekstremów. Dwoma najważniejszymi sekcjami w formacie DSL jest zapytanie (ang. Query) i filtrowanie (ang. Filter).

Sekcja "Query" służy do skonstruowania zapytania służącego do dopasowania i oceny danych na podstawie podanych kryteriów. Silnik Elasticsearch podczas wykonywania zapytania umieszczonego w tej sekcji dokonuje oceny trafności wyszukiwania. Najczęściej spotykane klauzule wewnątrz tej sekcji to:

- "match" – wyszukiwanie na podstawie tekstu,
- "term" – wyszukuje dokładny termin w polu,
- "range" – sprawdza dokumenty pod kątem podanego zakresu,
- "bool" – służy do łączenia wielu zapytań przy użyciu logiki.

Drugą sekcją najczęściej spotykaną jest "Filter" służący do zawężania listy wyników bez oceny trafności wyszukiwania. Najczęściej spotykane klauzule wewnątrz tej sekcji to:

- "term" – wyszukuje dokładny termin w polu,
- "range" – sprawdza dokumenty pod kątem podanego zakresu,
- "bool" – służy do łączenia wielu zapytań przy użyciu logiki.

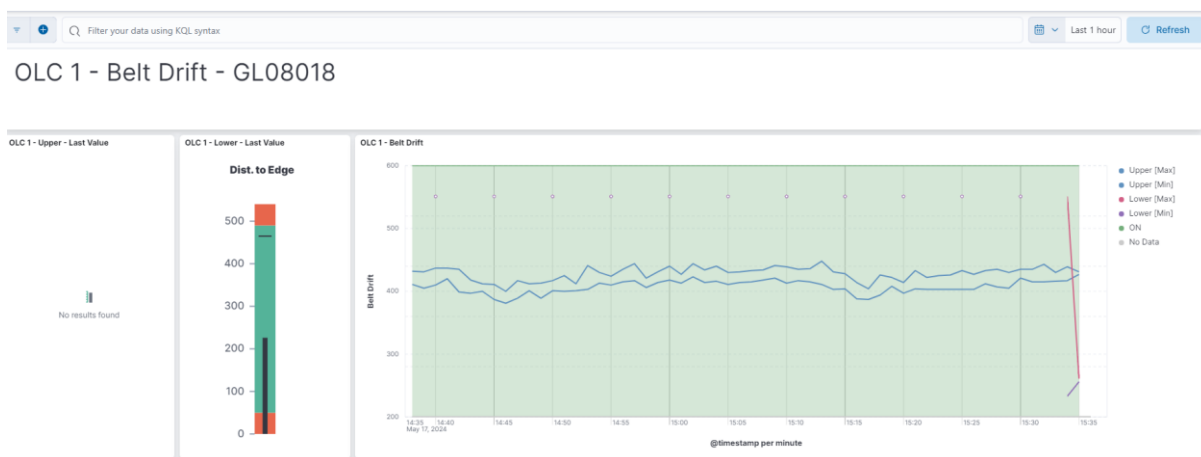
Wywołanie zapytania DSL wykonuje się poprzez wywołanie żądania "get" poprzez interfejs REST API udostępniany przez Elasticsearch. Żądanie "get" w zawartości musi posiadać zapytanie w formacie json zgodny z dokumentacją. Jako rezultat zwracane są rekordy zgodne z przesłanym zapytaniem.

4.2.2. Interfejs graficzny Kibana

W przypadkach mniej skomplikowanych wizualizacji danych został wykorzystany interfejs graficzny Kibana będący częścią ekosystemu Elasticsearch. Kibana tak jak inne aplikacje komunikuje się z silnikiem Elasticsearch za pomocą zapytań DSL. Dodatkowo aplikacja umożliwia tworzenie skryptów pozwalających w ograniczony sposób przetwarzać rezultaty zapytań. Mocną stroną narzędzia jest możliwość wizualizacji rekordów danych za pomocą wykresów i tabel.



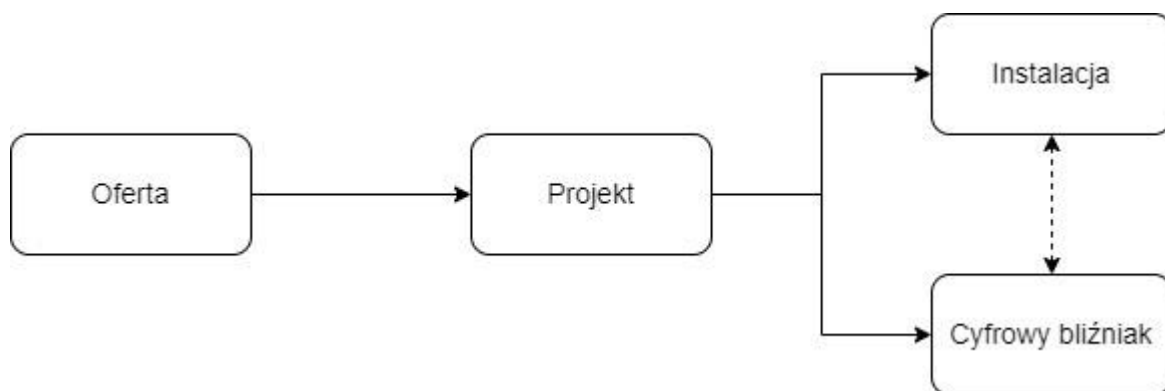
Rysunek 4.3 Przykładowy raport wygenerowany przez narzędzie Kibana dla naprężenia wstępnego taśmy.



Rysunek 4.4 Przykładowy raport wygenerowany przez narzędzie Kibana dla przesunięcia taśmy w badanym punkcie.

5. Tworzenie modelu

Jednym z celów postawionym przed pracą było opracowanie mechanizmów pozwalających na tworzenie modeli już podczas projektowania przenośników. Tworzenie pełnego modelu przenośnika posiad w uproszczeniu trzy fazy: przedstawienie klientowi oferty, następnie po jej akceptacji stworzeniu projektu. Na podstawie projektu natomiast tworzona jest konkretna instalacja. Na każdym z etapów może nastąpić przerwanie zamówienia, a więc istnieje konieczność ograniczenia prac, a co za tym idzie kosztów do niezbędnego minimum, ale tak aby zapewnić wymagania konkretnego etapu zamówienia.



Rysunek 5.1 Proces tworzenia instalacji i cyfrowego bliźniaka przonośnika.

Schematyczny proces realizacji zamówienia został przedstawiony na rysunku nr 5.1. Na każdym etapie model przonośnika jest wzbogacany o dodatkowe szczegóły. Na etapie ofertowym niezbędne jest poznanie geometrii trasy oraz głównych elementów konstrukcyjnych, min. w celu uzgodnienia przebiegu trasy oraz oszacowania kosztów. Następnie należy model uzupełnić o dane szczegółowe tak aby umożliwić dobór poszczególnych elementów instalacji oraz wyznaczyć projektowe obciążenia. Na podstawie tak stworzonego projektu otrzymujemy model przonośnika, który po połączeniu z danymi otrzymywanym z instalacji przonośnika staje się cyfrowym bliźniakiem.

Na podstawie zdefiniowanych wymagań opracowano pełny model trójwymiarowy przonośnika wraz z parametrami niezbędnymi do przeprowadzenia kompletnych obliczeń sił występujących na elementach instalacji oraz opracowano metodę budowania modelu wraz ze stworzeniem niezbędnych narzędzi.

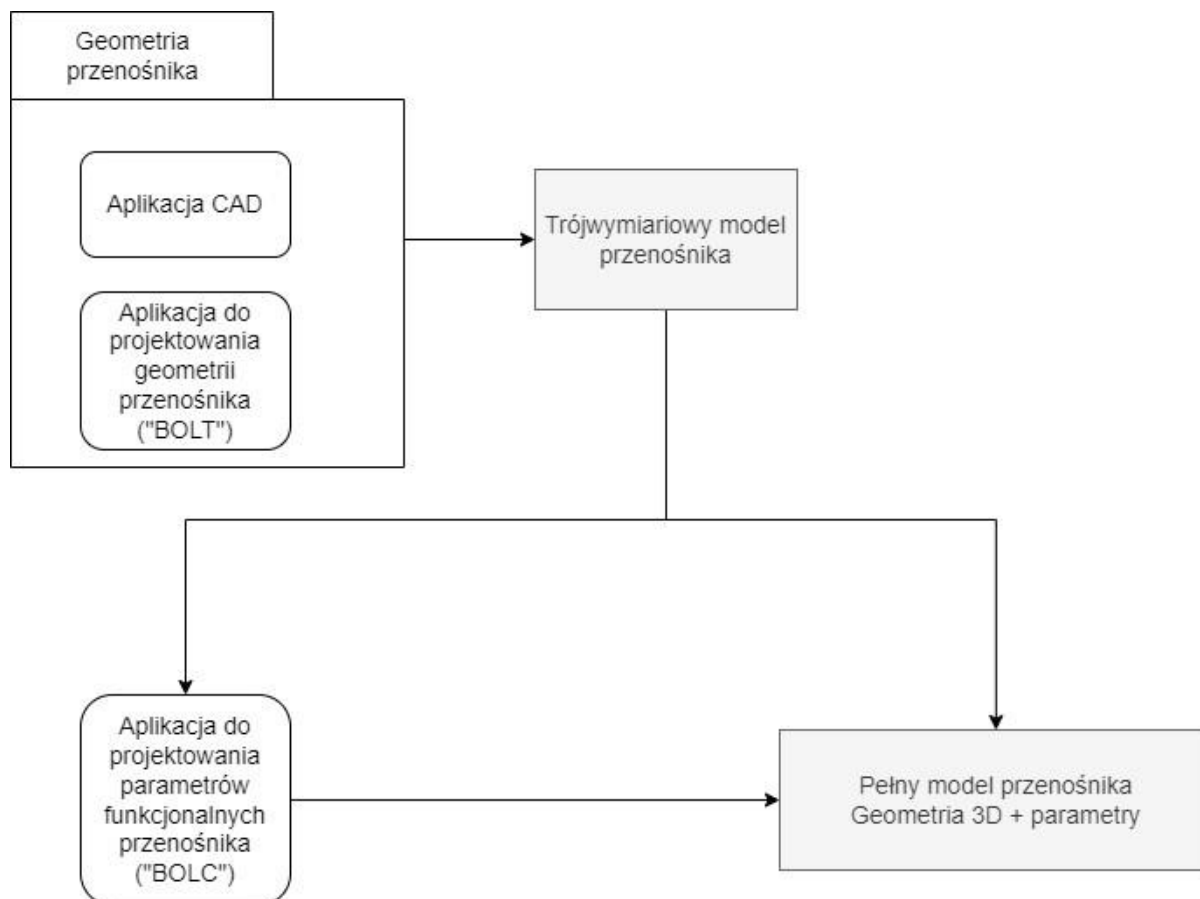
Model trójwymiarowy przonośnika budowany jest w dwóch etapach: pierwszy odpowiada za stworzenie modeli głównych elementów przonośnika (etap oferty) oraz geometrii trasy po której przemieszcza się taśma transportowa, drugi natomiast odpowiada za dostarczenia parametrów szczegółowych (etap projektu) tj. rodzaj taśmy, rozmiary elementów tj. krążniki, koła pasowe itp., moce silników oraz ich lokalizacja.

Pierwszy etap tworzony jest wewnątrz aplikacji typu CAD posiadającą dodatek będący autorskim rozszerzeniem programu. Dodatek służy do tworzenia z wykorzystaniem modeli elementów, instalacji przonośnika taśmowego. W rezultacie powstaje pełny trójwymiarowy model geometryczny zarówno w formacie CAD jak i w centralnej bazie danych. Model CAD służy w dalszej kolejności do generacji dokumentacji natomiast model zawarty w centralnej bazie danych jest pierwszym z etapów tworzenia cyfrowego bliźniaka.

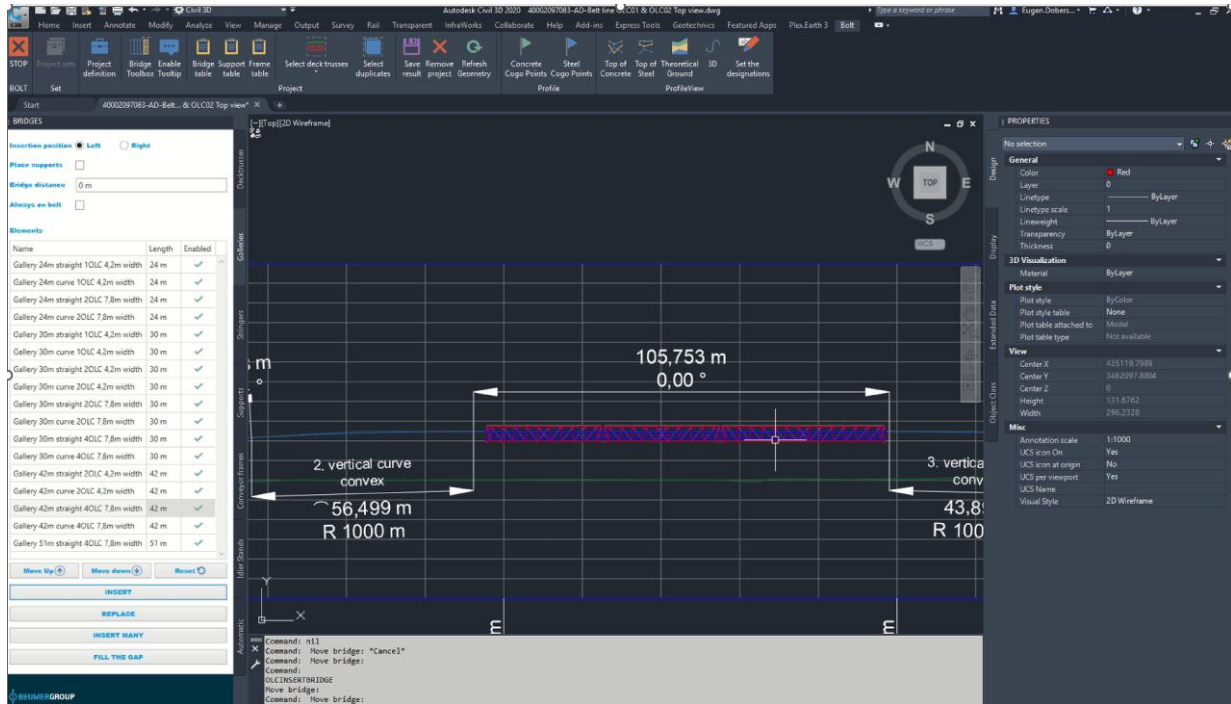
Drugie etap obsługiwany jest przez autorską aplikację z wbudowanymi obliczeniami wytrzymałości przonośnika (punkt 6 pracy). Dzięki zawartym algorytmom dopasowującymi aplikacja wspomaga dobór i uzupełnia model przonośnika o parametry

projektowe oraz jednocześnie zapewnia walidację przyjętych założeń podczas etapu tworzenia oferty.

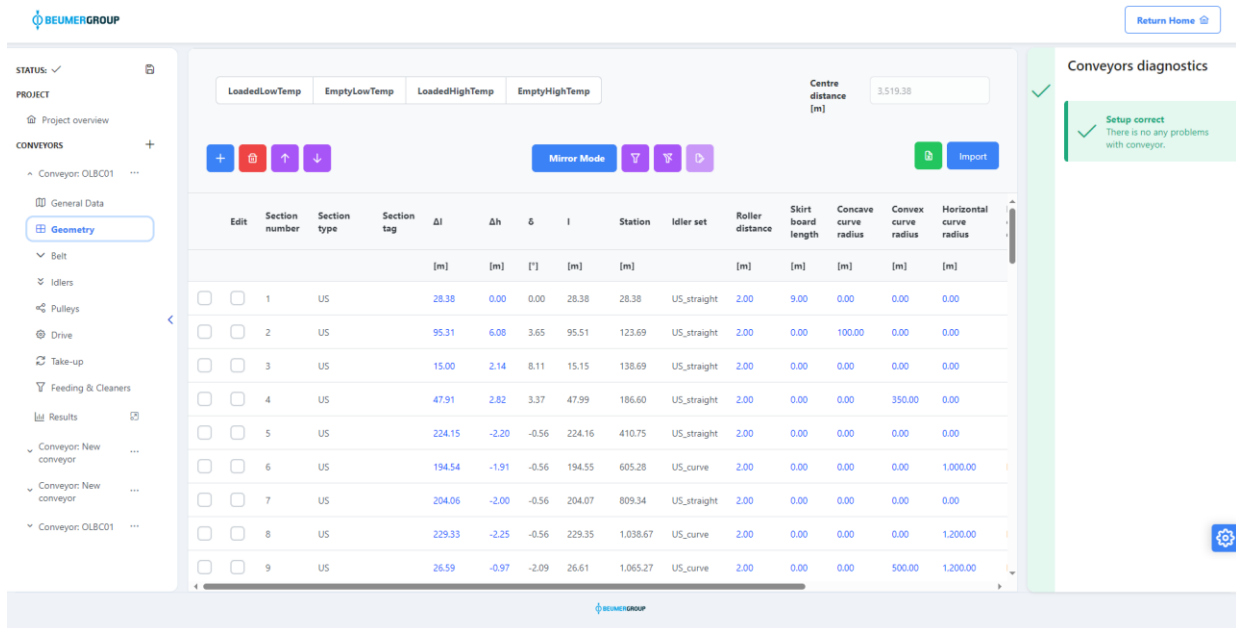
Na rysunku nr 5.2 zawarto schematyczny opis komponentów składających się na system tworzenia modelu. Natomiast na rysunku nr 5.3 przedstawiono widok interfejsu narzędzia służącego do budowy modelu geometrii natomiast na rysunku nr 5.4 widok interfejsu narzędzia do uzupełniania modelu o parametry. Na rynku nr 5.5 zaprezentowano przykładowy rezultat działania narzędzi za pomocą wizualizacji fragmentów przenośnika.



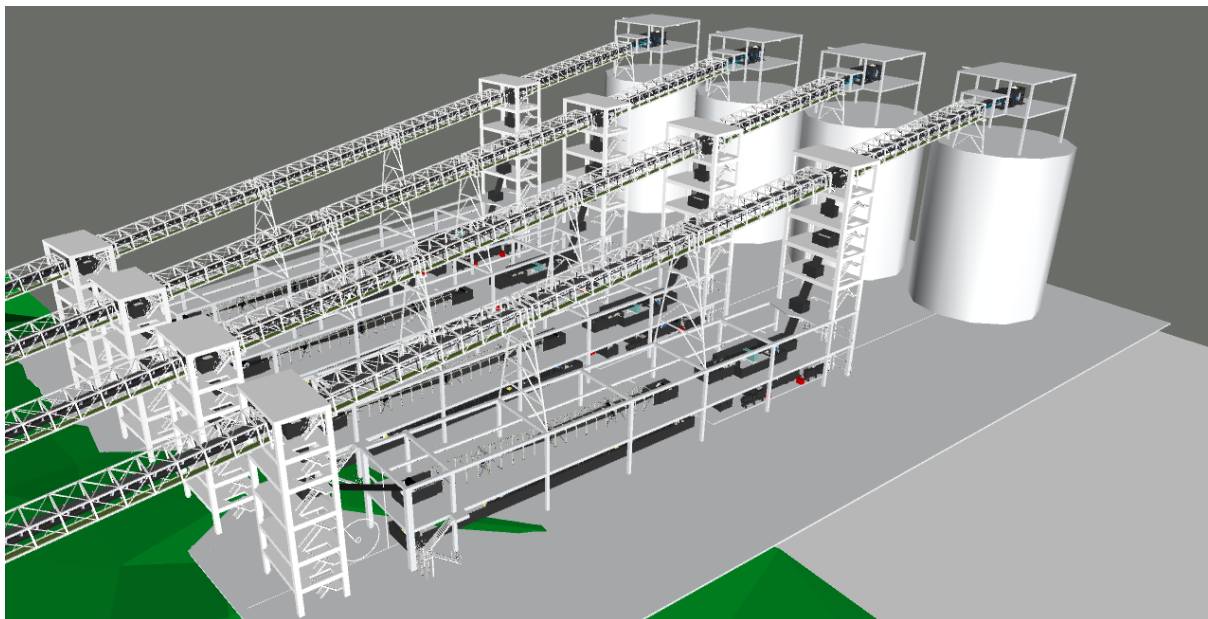
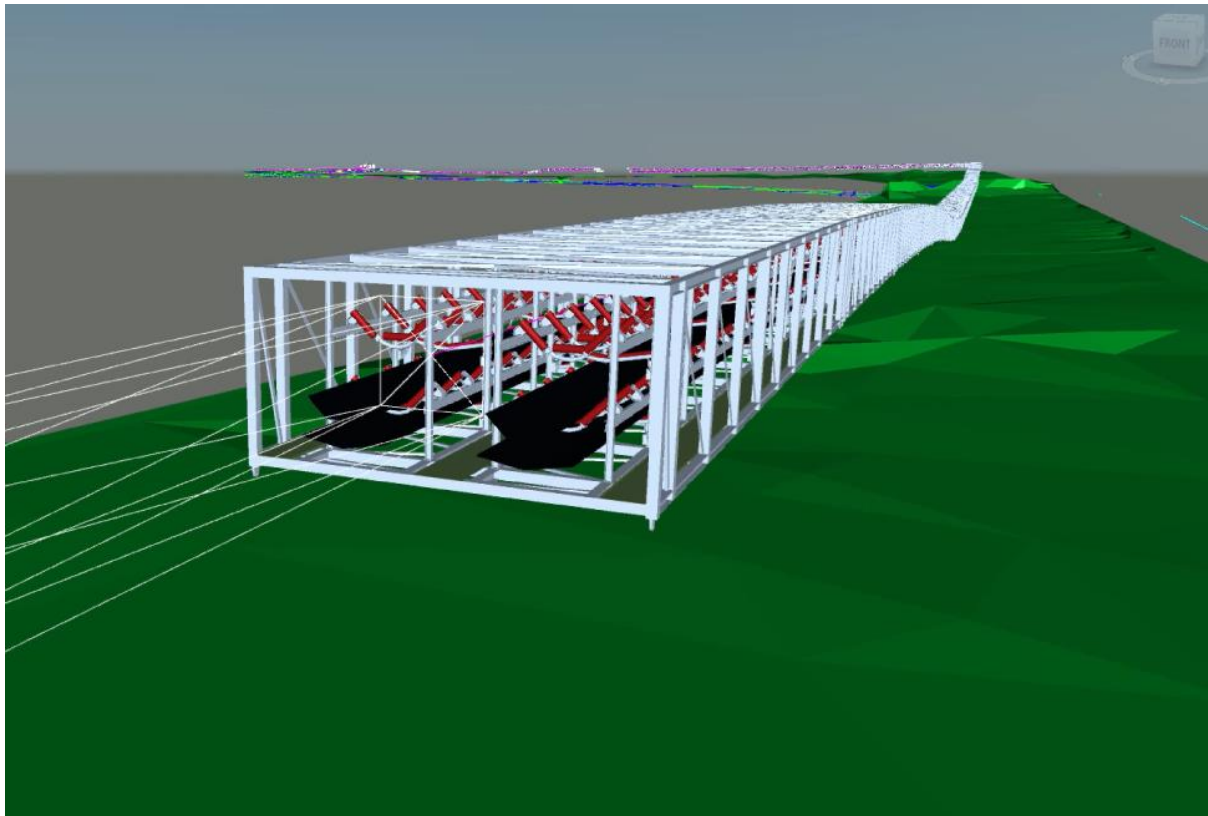
Rysunek 5.2 Budowanie modelu przenośnika.



Rysunek 5.3 Budowanie modelu przenośnika – geometria.



Rysunek 5.4 Budowanie modelu przenośnika - parametry.



Rysunek 5.5 Wizualizacja modelu przenośnika widok pojedynczego mostu oraz widok stacji rozładowania.

Do najważniejszych przechowywanych danych dotyczących geometrii należą:

- Dane dotyczące sekcji taśmy:
 - długość,
 - różnica poziomów,
 - promień łuku poziomego,
 - promień łuku pionowego wklęsłego,
 - promień łuku pionowego wypukłego.
- Dane na temat rozmieszczenia i rozmiaru kół pasowych:
 - miejsce posadowienia jako punkt 3D,
 - obrót względem osi x, y i z,
 - lokalizacja na względem taśmy,
 - długość kontaktu taśma-koło pasowe,
- Dane na temat rozmieszczenia i typu statywów krążników:
 - względne miejsce posadowienie (względem mostów),
 - bezwzględne miejsce posadowienia,
 - obrót względem osi x, y i z,
 - rotacje względem osi taśmy,
 - długość, szerokość i wysokość,
- Dane na temat rozmieszczenia i rozmiarów mostów:
 - miejsce posadowienia jako punkt 3D,
 - obrót względem osi x, y i z,
 - długość, szerokość i wysokość,
- Dane na temat rozmieszczenia i rozmiarów podpór:
 - miejsce posadowienia jako punkt 3D,
 - obrót względem osi x, y i z,
 - wysokość względem posadowienia na fundamencie,
 - rozmiary fundamentów,

Wszystkie powyższe dane przechowywane są wraz ze swoim rozmieszczeniem w przestrzeni trójwymiarowej.

Natomiast do najważniejszych przechowywanych danych dotyczących parametrów przenośnika:

- Dane dotyczące taśmy tj:
 - szerokość.
 - waga,
 - moduł elastyczności,
 - grubość,
 - grubość warstwy osłonowej.
- Dane dotyczące metody naprężania wstępnego taśmy, w tym typ zastosowanego mechanizmu.
- Dane na temat sposobu zatrzymywania i uruchamiania przenośnika.

- Parametry operacyjne kół pasowych:
 - średnica,
 - typ i grubość osłony.
- Dane na temat silników przenośnika.
- Parametry dotyczące nachylenia statywów na łukach przenośnika.
- Dane dotyczące oporów specjalnych.

Wszystkie powyższe dane składają się na pełny trójwymiarowy model przenośnika będący częścią składową cyfrowego bliźniaka.

6. Obliczenia Analityczne

Obliczenia oporów i sił oddziaływujących na elementy przenośnika jest złożonym zagadnieniem. W ramach obliczeń można wyróżnić szereg oddziaływań pomiędzy elementami instalacji, materiałem oraz środowiskiem zewnętrznym. W ramach wewnętrznych procesów rozwojowych firmy BEUMER został opracowany innowacyjny algorytm umożliwiający wyznaczenie parametrów związanych z wytrzymałością oraz stopniem zużycia przenośnika taśmowego. Algorytm opiera się na wyznaczaniu oporów kontaktowych, związanych z eksploatacją w szczególności pomiędzy taśmą, a elementami maszyny oraz naprężeniami wynikającymi z geometrii urządzenia. Obliczenia opierają się na normie DIN 22101 [75] oraz metodzie oporów jednostkowych. Przedstawione w następnych punktach procedury obliczeniowe wynikają z norm oraz badań i publikacji naukowych. Jako podstawę obliczeń sił kontaktowych wybrano opracowania Grimmera [63][76], Hettlera [62] oraz Kesslera [77]. Jako uzupełnienie zastosowana procedury dostarczone przez publikację Gładysiewicza [64] oraz Grabnera [78]. Obliczenia naprężenia taśmy opierają się, oprócz powyższych, na badaniach Limberba [65], Greuner [66], Hintz [79], Wennekamp [80] oraz Barbey [81]. Dodatkowo w badaniach i obliczeniach posłużono się normami DIN [75],[82],[83],[84]. Całość została zebrana w autorski algorytm postępowania opisany w punkcie 6.5.

Zgodnie z powyższymi pozycjami literaturowymi opór całkowity sekcji i może zostać określony za pomocą wzoru:

$$F_{W,i} = F_{H,i} + F_{N,i} + F_{St,i} + F_{S,i} \quad (6.1)$$

Gdzie:

$F_{H,i}$ – opory główne

$F_{N,i}$ -opory drugorzędne

$F_{St,i}$ -opory związane ze zmianą wysokości

$F_{S,i}$ -opory specjalne

Poszczególne opory mogą być wyznaczone różnymi metodami. Poniżej zamieszczono porównanie metod zawartych w normie DIN oraz metody oporów jednostkowych. W punktach poniżej przedstawione główne wzory obliczeniowe. Szczegółowe procedury postępowania co do poszczególnych elementów znajdują się w przytoczonej literaturze lub stanowią tajemnicę przedsiębiorstwa i z tego powodu nie zostały zaprezentowane w pracy.

6.1. Opory główne oraz drugorzędne wg DIN 22101

Metoda szacowania oporów przenośnika zawarta w normie DIN 22101 [85] jest podejściem uproszczonym w stosunku do metody oporów jednostkowych, jednakże znajduje ona zastosowanie w przypadku braku wiedzy na temat charakterystyki elementów zamontowanych na przenośniku. W poniższych punktach zostały przedstawione formuły pozwalające wyznaczyć najważniejsze składowe oporów, istotne w kontekście rozważań zawartych w pracy, natomiast nie przedstawiono uszczegółowień, ponieważ są one zawarte w tekście normy.

6.1.1. Opory główne

Założenie obliczeń oporów głównych wg metody zaprezentowanej w normie DIN 22101 opiera się na oszacowaniu ich poprzez przemnożenie mas elementów przemieszczających się na przenośniku poprzez współczynnik f .

$$F_{H,i} = l_i * f_i * g * [m'_{R,i} + (m'_G + m'_{L,i}) * \cos \delta_i] \quad (6.2)$$

Gdzie:

l_i [m] - długość sekcji

f [-] - współczynnik oporów zależny od temperatury i rozwiązań zastosowanych w przenośniku

$m'_{R,i}$ [kg/m] - masa elementów obracających w przeliczeniu na metr sekcji i

m'_G [kg/m] - masa metra bieżącego taśmy transmisyjnego

$m'_{L,i}$ [kg/m] - masa materiału na metr bieżący przenośnika

g - stała grawitacyjna

δ_i [rad] – kąt nachylenia danej sekcji

6.1.2. Opory drugorzędne

Na opory drugorzędne składają się opory występujące tylko w niektórych miejscach przenośnika tj. np. miejsca podawania. Ponieważ rozważania dotyczą przenośników o znacznej długości, opory drugorzędne stanowią znikomą część oporów głównych. Według metody DIN opory drugorzędne mogą zostać wyznaczone jako procent oporów głównych. Parametr C może zostać odczytany w tabelach zawartych w normie.

$$F_{N,i} = (C - 1) * F_{H,i} \quad (6.3)$$

6.2. Opory główne oraz drugorzędne według obliczeń szczegółowych

Wzory zaprezentowane są dla wariantu oparcia taśmy transportowej na trzech krążnikach oraz przedstawiane są dla pojedynczego statywu. W celu wyznaczenia wartości dla całej sekcji należy rezultaty pomnożyć poprzez ilość zamontowanych statywów.

6.2.1. Opory główne

- Opór wynikający z obrotu krążników

Opór obrotu krążników wynika wprost z oporu obrotu łożysk zamontowanych w ich wnętrzu. Wartość obrotu może zostać wyznaczona zgodnie ze wzorem lub dokładniej za pomocą pomiarów laboratoryjnych.

$U_{RSt,i}$ opór wynikający z sił tarcia powstających na skutek ruchu obrotowego krążniki.

$$U_{RSt,i} = c_R(v) \cdot (F_{N1,i} + F_{N2,i} + F_{NM,i}) + U'_0(T) \quad (6.4)$$

Gdzie:

$F_{N1,i}$ – siła normalna oddziaływująca na krążnik nr 1

$F_{N2,i}$ – siła normalna oddziaływująca na krążnik nr 2

$F_{NM,i}$ – siła normalna oddziaływująca na krążnik środkową

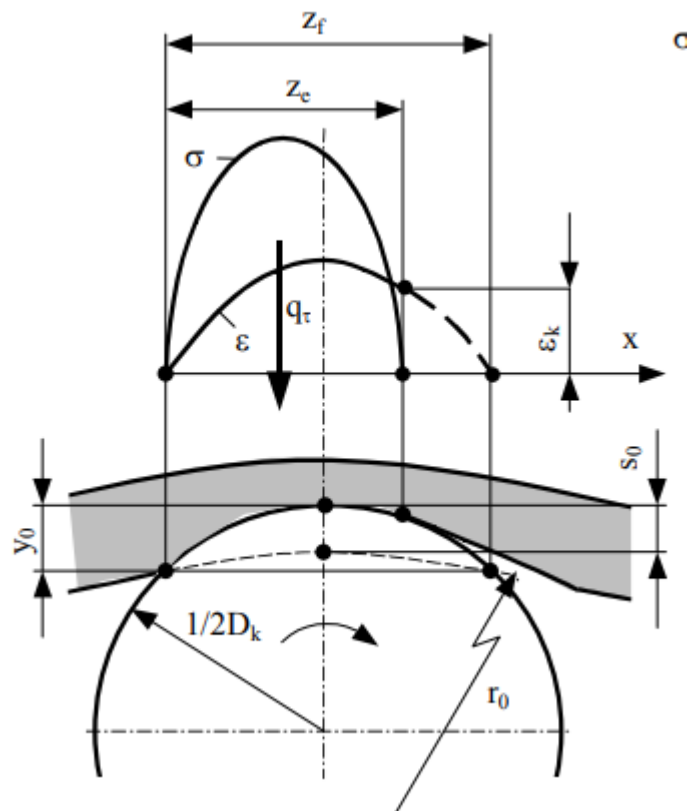
$c_R(v)$ – współczynnik oporów toczenia w funkcji prędkości obrotowej

$U'_0(T)$ – niezależny od sił opór toczenia w funkcji temperatury

Powyższe wartości sił mogą zostać również określone w badaniach laboratoryjnych. Na potrzeby symulacji badania zostały przeprowadzone w oparciu o normę DIN 22122 [t16].

- Opór wgniatania taśmy

Opór wgniatania taśmy $U_{E,i}$ wynika z oddziaływania na styku krążnik i taśma. Z definicji opór wgniata taśmy wynika z występowania sił wewnątrz taśmy powstających na skutek zmniejszenia jej przekroju podczas toczenia na rolce. Schematycznie zostało to przedstawione na rysunku 6.1 opracowanym przez Gładysiewicza [64]



Rysunek 6.1 Schemat do analizowania oporu toczenia taśmy po krążniku [64].

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na wartość oporu mają parametry operacyjne takie jak naprężenie taśmy, temperatura elementów i środowiska zewnętrznego, średnica krążnika lub koła pasowego, elementy z jakich wykonany jest taśma i krążnik. Ogólny wzór pozwalający wyznaczyć wartość oporów wgniatania taśmy został przedstawiony poniżej.

$$U_{Eii} = c_{ERW} \cdot c_{EFN} \cdot \left[\left(\frac{F_{NM,i}}{l_{RBMz}} \right)^{n_{EFN}} \cdot l_{RBM,j} + \frac{l_{RBSz,j}}{n_{EFN}+1} \cdot \left(\left(\frac{2 \cdot F_{N1,i}}{l_{RBSz,i}} \right)^{n_{EFN}} + \left(\frac{2 \cdot F_{N2,i}}{l_{RBSz,i}} \right)^{n_{EFN}} \right) \right] \quad (6.5)$$

Gdzie:

l_{RBxz} – długość kontaktu z krążnikiem

c_{ERW} , c_{EFN} , n_{EFN} – współczynniki zależne od parametrów operacyjnych

Powyższe wartości sił mogą zostać również określone w badaniach laboratoryjnych. Na potrzeby symulacji badania zostały przeprowadzone w oparciu o normę DIN 22123 [82].

- Opór zginania taśmy i elastyczności materiału

Opór ten powstaje na skutek cyklicznego deformowania taśmy na przejściach pomiędzy statywami z zamontowanymi krążnikami. Taśma wraz z transportowanym materiałem na skutek oddziaływania sił grawitacji opada pomiędzy statywami z krążnikami. Z powodu występującego z tego powodu zginania taśmy oraz materiału powstają opory transportowe.

Istnieją różne podejścia do obliczeń w celu określenia wytrzymałości na zginanie i elastyczności. Obliczenia wykonane w ramach pracy opierają się na podejściu Limberga [65]. W oparciu o badania różnych systemów przenośników taśmowych Limberg wybrał podejście wspólnego określania wytrzymałości taśmy na zginanie i elastyczności materiału:

$$U_{B,i}'' + U_{L,i}'' = \frac{k_{BL}'' * [(m'_{L,i} + m'_{G}) * g * l_{R,i}]^2}{T_{i,avg.}} \quad (6.6)$$

Gdzie:

$l_{R,i}$ – odległość pomiędzy statywami

$T_{i,avg.}$ – średnie naprężenie taśmy

k_{BL}'' – współczynnik zginania

6.2.2. Opory drugorzędne

- Opór bezwładności transportowanego materiału i opór tarcia pomiędzy transportowanym materiałem a taśmą w miejscu podawania

$$F_{Auf} = I_m * (v - v_0) \quad (6.7)$$

Gdzie

I_m - masa materiału w miejscu podawania

v - prędkość transportowa

v_0 - prędkość podawania materiału

- Opory tarcia pomiędzy przenośnikiem taśmowym a zypami bocznymi w strefie przyspieszania punktu załadunkowego

$$F_{Schb} = c_{Schb} * c_{Rank} * \left[\frac{2 * I_m}{(v + v_0) * \rho} - (b_{Sch}^2 - l_M^2) * \frac{\tan \lambda}{4} \right]^2 * \frac{\rho * g * l_b * \mu_2}{b_{Sch}^2} \quad (6.8)$$

$$l_b > l_{b,min} = \frac{v^2 - v_0^2}{2 * g * \mu_1} \quad (6.9)$$

Gdzie:

b_{Sch} - maksymalna szerokość kontaktu materiału z taśmą

c_{Schb}, c_{Rank} – współczynniki zależne od rozwiązań konstrukcyjnych przenośnika

μ_1, μ_2 - współczynniki tarcia

λ – kąt nachylenia krążników bocznych

- Opór tarcia powodowany przez elementy czyszczące pas

$$F_{Gr} = \mu_4 * p_{Gr} * A_{Gr} \quad (6.10)$$

Gdzie:

μ_4 - współczynnik tarcia

p_{Gr} – ciśnienie kontaktowe

A_{Gr} - efektywna powierzchnia kontaktowa

6.3. Opory związane ze zmianą geometrii

Ze względu i przenośnik może transportować materiał na różne wysokości należy uwzględnić również zmianę energii elementów przenośnika oraz transportowanego materiału. Ze względu na charakter opory te mogą również przyjmować wartości ujemne.

$$F_{St,i} = h_i * g * (m'_G + m'_{L,i}) \quad (6.11)$$

Gdzie:

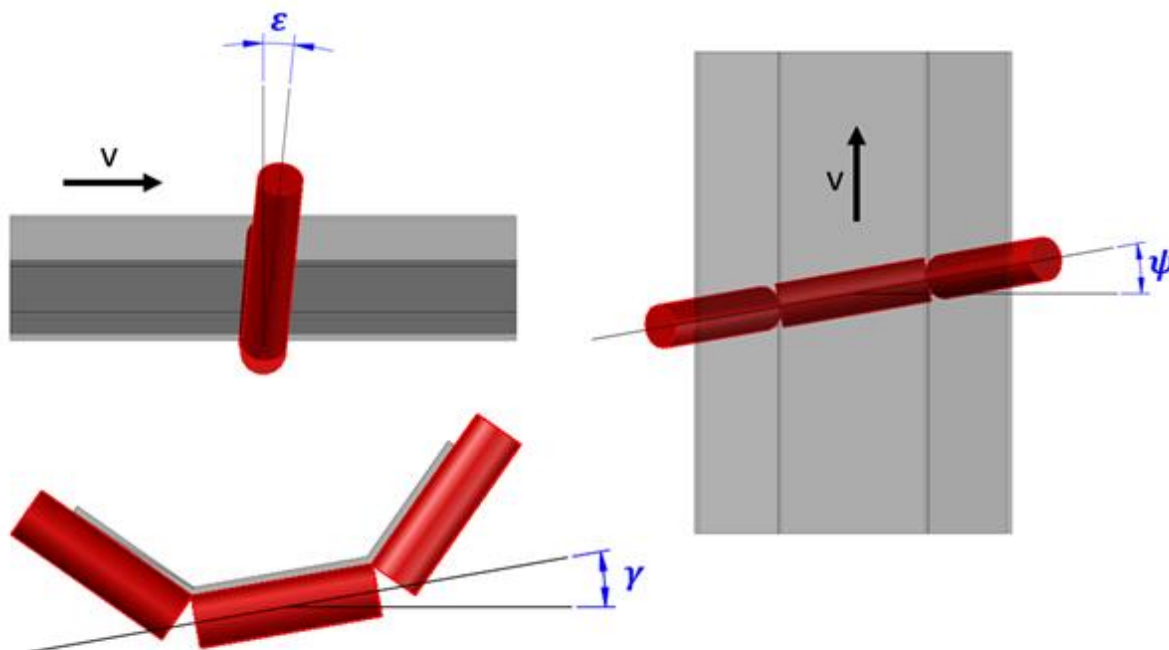
h_i [m] – zmiana wysokości względem początku sekcji

m'_G [kg/m] - masa metra bieżącego taśmy transmisyjnego

$m'_{L,i}$ [kg/m] - masa materiału na metr bieżący przenośnika

6.4. Opory specjalne

Na opory specjalne składają się głównie opory wynikające z pochylenia statywu, na którym przemieszcza się taśma a także z przemieszczania się taśmy i samego materiału po łuku.



Rysunek 6.2 Ilustracja kątów obrotu statywu krążników [64].

$$F_{Rst} = F_{V,1} + F_{V,m} + F_{V,2} \quad (6.12)$$

Gdzie F_{Rst} jest całkowitym oporem na całym statywie a poszczególne opory mogą zostać określone następująco (1 – krążnik wewnętrzna, m – środkowa, 2 – krążnik zewnętrzna)

$$F_{V,1} = \left| \frac{F_{HR,1} * \sin \varphi_{1,eff}}{\cos \varphi_{1,eff}} \right| \quad (6.13)$$

$$F_{V,m} = \left| \frac{F_{HR,m} * \sin \varphi_{m,eff}}{\cos \varphi_{m,eff}} \right| \quad (6.14)$$

$$F_{V,2} = \left| \frac{F_{HR,2} * \sin \varphi_{2,eff}}{\cos \varphi_{2,eff}} \right| \quad (6.15)$$

Gdzie F_{HR} jest siłą tarcia określoną dla każdej krążniki za pomocą wzorów 6.19, 6.20 i 6.21 natomiast φ_{eff} jest kątem efektywnym i może być określony dla każdej krążniki za pomocą wzoru:

$$\varphi_{1,eff} = \tan^{-1}(\tan \psi * \cos(\lambda_1 + \gamma)) + \varepsilon_1 \quad (6.16)$$

$$\varphi_{m,eff} = \tan^{-1}(\tan \psi * \cos(\gamma)) \quad (6.17)$$

$$\varphi_{2,eff} = \tan^{-1}(\tan \psi * \cos(\lambda_2 - \gamma)) + \varepsilon_2 \quad (6.18)$$

$$F_{HR,1} = \text{sign}(\varphi_{1,eff}) * F_{N,1} * \mu_1 * \cos \varphi_{1,eff} \quad (6.19)$$

$$F_{HR,m} = \text{sign}(\varphi_{M,eff}) * F_{N,m} * \mu_m * \cos \varphi_{m,eff} \quad (6.20)$$

$$F_{HR,2} = \text{sign}(\varphi_{2,eff}) * F_{N,2} * \mu_2 * \cos \varphi_{2,eff} * (-1) \quad (6.21)$$

Gdzie μ jest współczynnikiem tarcia natomiast F_N siłą normalną oddziaływującą na krążnik. Może ona być wyznaczona jako suma składowych za pomocą wzoru 6.22:

$$F_{N,x} = F_{NB,x} + F_{NG,x} + F_{NH,x} + F_{NMB,x} + F_{NMG,x} + F_{NV,x} \quad (6.22)$$

Gdzie:

x – pozycja krążniki 1 – wewnętrzna, m – środkowa, 2 - zewnętrzna

F_{NB} - składowa siły normalnej wynikająca od masy i elastyczności taśmy

F_{NG} - składowa siły normalnej wynikająca od masy transportowanego materiału

F_{NH} - składowa siły normalnej wynikająca z naprężenia taśmy na łukach horyzontalnych

F_{NMB} - składowa siły normalnej wynikająca z siły odśrodkowej działającej na pas

F_{NMG} - składowa siły normalnej wynikająca z siły odśrodkowej działającej na materiał

F_{NV} - składowa siły normalnej wynikająca z naprężenia taśmy na łukach wertykalnych

- Składowa siły normalnej wynikająca od masy i elastyczności taśmy może zostać wyznaczona w następujący sposób

$$F_{NB,1} = \cos \delta * \frac{G_B}{B} * s_{B,1} * \cos(\lambda_1 + \gamma) * k_{S,1} \quad (6.23)$$

$$F_{NB,M} = \cos \delta * \frac{G_B}{B} * [(l_M * \cos \gamma) + (s_{B,1} * \sin(\lambda_1 + \gamma) * \sin \lambda_1) + (s_{B,2} * \sin(\lambda_2 - \gamma) * \sin \lambda_2)] * k_M \quad (6.24)$$

$$F_{NB,2} = \cos \delta * \frac{G_B}{B} * s_{B,2} * \cos(\lambda_2 - \gamma) * k_{S,2} \quad (6.25)$$

Gdzie:

δ – kąt nachylenia danej sekcji przenośnika

G_B -masa taśmy przypadająca na jeden statyw

B – szerokość taśmy

k_S, k_M - współczynniki korekcyjne wynikające z elastyczności taśmy

$s_{B,1}$, $s_{B,2}$ – długość kontaktu krążniki z pasem

- składowa siły normalnej wynikająca od masy transportowanego materiału

$$F_{NG,1} = G_{G,1} * \cos(\lambda_1 + \gamma) \quad (6.26)$$

$$F_{NG,m} = G_{G,m} * \cos(\gamma) \quad (6.27)$$

$$F_{NG,2} = G_{G,2} * \cos(\lambda_2 - \gamma) \quad (6.28)$$

Gdzie:

G_G -masa transportowanego materiału przypadająca na jeden statyw

- składowa siły normalnej wynikająca z naprężenia taśmy na łukach horyzontalnych

$$F_{NH,1} = -\frac{s_{B,1}}{B} * \sin(\lambda_1 + \gamma) * F_Q \quad (6.29)$$

$$F_{NH,m} = -\frac{l_m}{B} * \sin \gamma * F_Q \quad (6.30)$$

$$F_{NH,2} = \frac{s_{B,2}}{B} * \sin(\lambda_2 - \gamma) * F_Q \quad (6.31)$$

Gdzie F_Q jest siłą oddziaływującą od wewnętrznej strony łuku wyrażonej wzorem:

$$F_Q = -\frac{F_T * l_R}{R_{Hor.}} \quad (6.32)$$

oraz:

F_T - naprężenie taśmy

l_R – odległość pomiędzy statywami

$R_{Hor.}$ – średnica łuku

F_{NV} - składowa siły normalnej wynikająca z naprężenia taśmy

- składowa siły normalnej wynikająca z siły odśrodkowej działającej na pas

$$F_{NMB,1} = -\frac{s_{B,1}}{B} * m_B * l_R * \frac{v^2}{R_{Hor.}} * \sin(\lambda_1 + \gamma) \quad (6.33)$$

$$F_{NMB,m} = -\frac{l_m}{B} * m_B * l_R * \frac{v^2}{R_{Hor.}} * \sin \gamma \quad (6.34)$$

$$F_{NMB,2} = \frac{s_{B,2}}{B} * m_B * l_R * \frac{v^2}{R_{Hor.}} * \sin(\lambda_2 - \gamma) \quad (6.35)$$

- składowa siły normalnej wynikająca z siły odśrodkowej działającej na materiał

$$F_{NMG,1} = -m_{G,1} * \frac{v^2}{R_{Hor.}} * \sin(\lambda_1 + \gamma) \quad (6.36)$$

$$F_{NMG,m} = -m_{G,m} * \frac{v^2}{R_{Hor.}} * \sin \gamma \quad (6.37)$$

$$F_{NMG,2} = m_{G,2} * \frac{v^2}{R_{Hor.}} * \sin(\lambda_2 - \gamma) \quad (6.38)$$

- składowa siły normalnej wynikająca z naprężenia taśmy na łukach wertykalnych

$$F_{NV,1} = \frac{s_{B,1}}{B} * F_T * \frac{l_R}{R_V} * \cos(\lambda_1 + \gamma) \quad (6.39)$$

$$F_{NV,m} = \frac{l_m}{B} * F_T * \frac{l_R}{R_V} * \cos \gamma \quad (6.40)$$

$$F_{NV,2} = \frac{s_{B,2}}{B} * F_T * \frac{l_R}{R_V} * \cos(\lambda_2 - \gamma) \quad (6.41)$$

6.5. Wyznaczenie naprężenia taśmy oraz przesunięcia taśmy na łukach

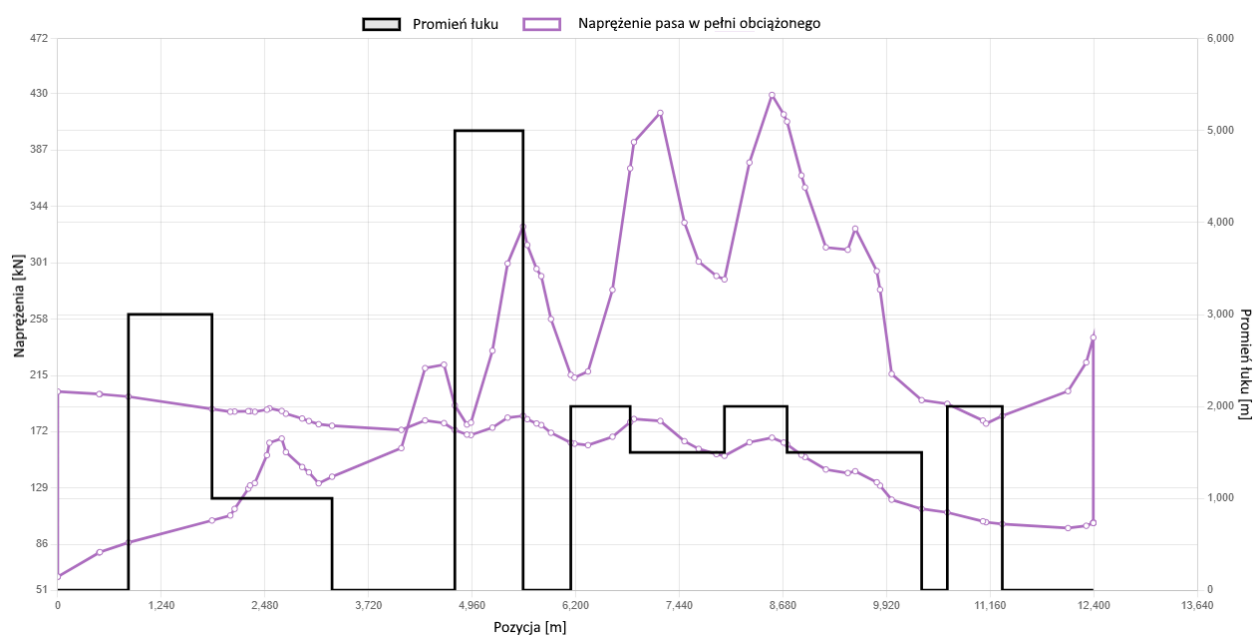
W ramach pracy wprowadzono autorski algorytm postępowania w celu wyznaczania sił, oporów i naprężeń występujących na przenośnikach taśmowych. W zakresie wiedzy na temat oddziaływań pomiędzy elementami przenośnika algorytm bazuje na wiedzy wewnętrznej firmy BEUMER oraz publikacjach i badaniach naukowych. Podstawowe wzory użyte w obliczeniach zostały opisane w punktach od 6.1 do 6.4. Całość została zebrana w algorytm postępowania wraz z analizą złożoności czasowej wykonywania obliczeń oraz wprowadzono przetwarzanie wielowątkowe. W ramach prac wprowadzono mechanizmy pozwalające na parametryzację modelu w celu późniejszego dopasowania oraz wprowadzono mechanizmy pozwalające na wyznaczanie naprężeń i przesunięć taśmy w dowolnych miejscach przenośnika.

Ze względu na konieczność wyznaczenia długości kontaktu s_B taśmy z krążnikiem konieczne jest wyznaczenie przemieszczenia się taśmy na łukach. W tym celu należy zrównoważyć siły działające dośrodkowo i odśrodkowo. Poszczególne siły które były uwzględniane w obliczeniach są opisane w punkcie 6.4. Dodatkowo ze względu na konieczność użycia w obliczeniach naprężenia F_T , które jest wartością średnią dla danej sekcji niezbędne jest również zrównoważenie w obliczeniach wartości początkowej i końcowej naprężenia w ramach badanej sekcji. Procedura obliczeniowa wprowadzona w ramach pracy została opisana na rysunku nr 6.3. Wprowadzona procedura jest innowacyjnym podejściem pozwalającym zarówno bardzo szczegółowo opisać zjawiska występujące na łukach jak i zoptymalizować dopasowanie modelu do rzeczywistej instalacji (opisane w punkcie 6.6).

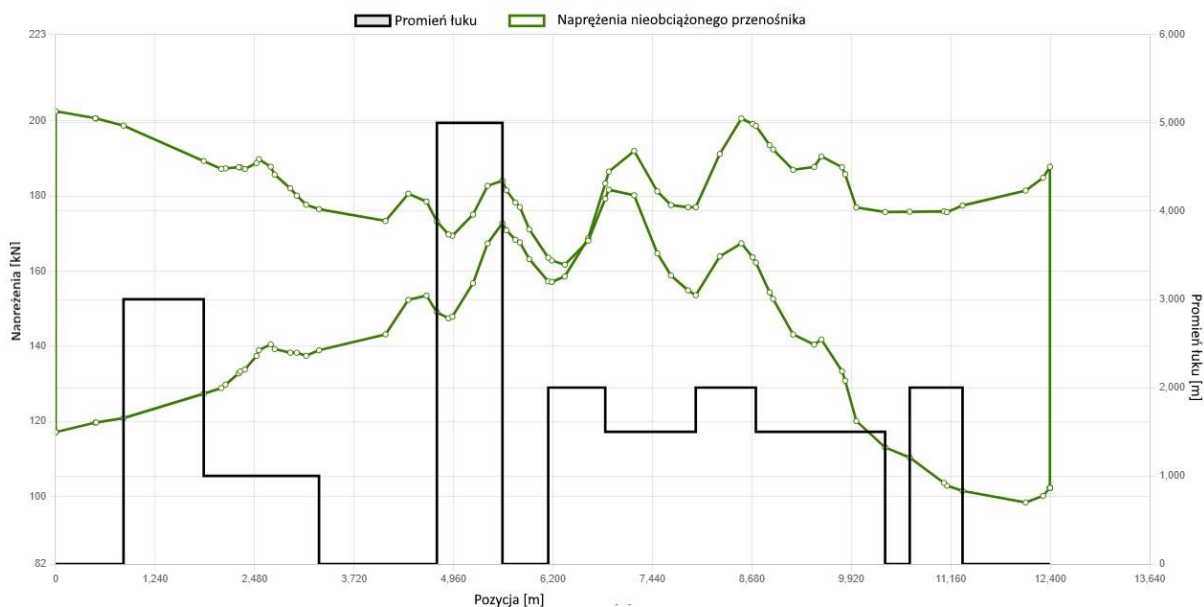


Rysunek 6.3 Procedura napięcia taśmy oraz przesunięcia taśmy na łukach.

W ramach badań przeprowadzonych na przenośniku opisanym w punkcie 3 pracy wyznaczono naprężenia, które występują podczas stabilnej pracy bez zmiany obciążenia ani prędkości. Na rysunku 6.4 zaprezentowano rezultaty dla przenośnika w pełni obciążonego, natomiast na rysunku 6.5 dla przenośnika pracującego bez obciążenia. Na obu rysunkach zaznaczono średnicę i występowanie łuków poziomych. Warto tutaj zaznaczyć, iż praca stabilna z pełnym obciążeniem nie jest momentem najbardziej obciążającym przenośnik.



Rysunek 6.4 Naprężenia na badanym przenośniku pracującym z obciążeniem.



Rysunek 6.5 Naprężenia na badanym przenośniku pracującym bez obciążenia.

W tabelach 6.1. oraz 6.2. zawarto rezultaty z obliczeń oporów odpowiednio dla pracy z pełnym obciążeniem i bez.

	Opory dla przenośnika całkowicie obciążonego materiałem		
	Suma	Górny pas	Dolny pas
	[kN]		
Opór toczenia krążników	69,622	52,316	17,306
Opór wgniatania taśmy	183,231	155,456	27,776
Opory wynikające ze zginania taśmy i materiału	76,027	73,003	3,024
Opór podnoszenia materiału i taśmy	-148,967	-174,427	25,46
Opory wynikające z nachylenia statywów krążników	102,923	76,199	26,724
Suma	282,837	182,548	100,289

Tabela 6.1 Opory pracy przenośnika w pełni obciążonego.

	Opory dla przenośnika bez materiału		
	Suma	Górny pas	Dolny pas
	[kN]		
Opór toczenia krążników	62,818	45,512	17,306
Opór wgniatania taśmy	55,892	28,117	27,776
Opory wynikające ze zginania taśmy i materiału	4,361	1,337	3,024
Opór podnoszenia materiału i taśmy	0	-25,46	25,46
Opory wynikające z nachylenia statywów krążników	47,886	21,163	26,724
Suma	170,958	70,668	100,289

Tabela 6.2 Opory pracy przenośnika pracującego bez obciążenia.

W załączniku nr 1 oraz nr 2 zawarto szczegółowe rezultaty występujących naprężeń dla przenośnika pracującego z pełnym obciążeniem i bez.

7. Dopasowanie modelu przenośnika za pomocą mechanizmów uczenia maszynowego

Opisana w punkcie 6 metoda obliczeniowa stanowi doskonałe narzędzie do projektowania oraz analizy sił i oporów występujących na przenośniku. Jednakże ze względu na rozbieżności pomiędzy danymi katalogowymi a rzeczywiście zamontowanymi elementami istnieje konieczność dopasowania przyjętych wartości współczynników do rzeczywistych wartości pomiarowych występujących podczas użytkowania danej instalacji.

Model przenośnika w proponowanej metodzie składa się z wartości pomiarowych oraz obliczeniowych. Natomiast niektóre wartości tj. naprężenie taśmy, moment obrotowy na kołach pasowych czy przesunięcie taśmy są mierzone i również możliwe do obliczenia. Na podstawie w/w zależności oraz danych pomiarowych istnieje możliwość dopasowania wartości obliczeniowych oraz pomiarowych. W zależności od opomiarowania istnieje możliwość przyjęcia kilku strategii dopasowania. Najbardziej podstawowym jest dopasowanie na podstawie pomiarów naprężenia taśmy oraz momentu obrotowego silników napędowych. Dużo dokładniejsze dopasowanie możliwe jest z użyciem pomiarów przesunięcia taśmy na łukach, ponieważ w tym przypadku możliwe jest rozpatrywanie przypadków jednostkowo. Niezależnie od możliwej do wdrożenia strategii dopasowanie opiera się na korekcji przyjętych współczynników z założeniem zdefiniowanej geometrii taśmociągu. Aby dopasować model badanego przenośnika użyto metody gradientu opisanej w punkcie 7.1.

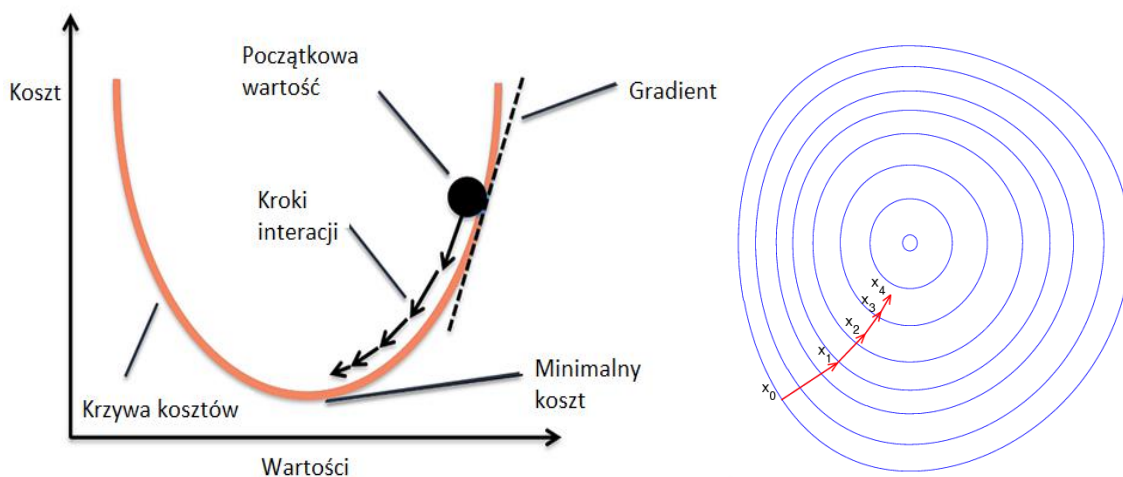
7.1. Metoda gradientu.

Metoda gradientu jest jedną z najpopularniejszych metod dopasowania stosowaną do trenowania modeli w uczeniu maszynowym (ang. Machine Learning) oraz w głębokim uczeniu (ang. Deep Learning). Metoda służy do znajdowania minimum lokalnego funkcji różniczkowalnych poprzez określenie współczynników funkcji, które minimalizują funkcję kosztów. Uproszczony wzór określający kolejne kroki dopasowania dla przypadku funkcji jednej zmiennej został przedstawiony za pomocą formuły 7.1. Gdzie α_k określa długość kolejnych kroków natomiast $\nabla f(x_k)$ określa gradient funkcji celu.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k \nabla f(x_k) \quad (7.1)$$

W pierwszym kroku algorytmu niezbędne jest określenie wartości początkowych poszukiwanych parametrów oraz wag α_k . Określenie w/w wartości jest niezbędne i może wymagać kilku iteracji, ponieważ metoda służy do określenia minimum lokalnego, a więc jest wrażliwa na dane wejściowe. Określenie wag na odpowiednim poziomie wpływa natomiast na jakość działania algorytmu, zbyt duże wagi mogą doprowadzić do generowania błędnych wyników, natomiast zbyt małe mogą wydłużyć znacząco proces

obliczeniowy. Po określeniu parametrów inicjalizacyjnych należy w sposób iteracyjny wykonywać obliczenia za pomocą wzoru 7.1, aż do spełnienia założonych kryteriów dopasowania. Dopuszczalna jest również zmiana wag podczas działania algorytmu. Schematyczny opis działania algorytmu został zaprezentowany na rysunku nr 7.1.



Rysunek 7.1 Schemat działania metody gradientu [m1][m2].

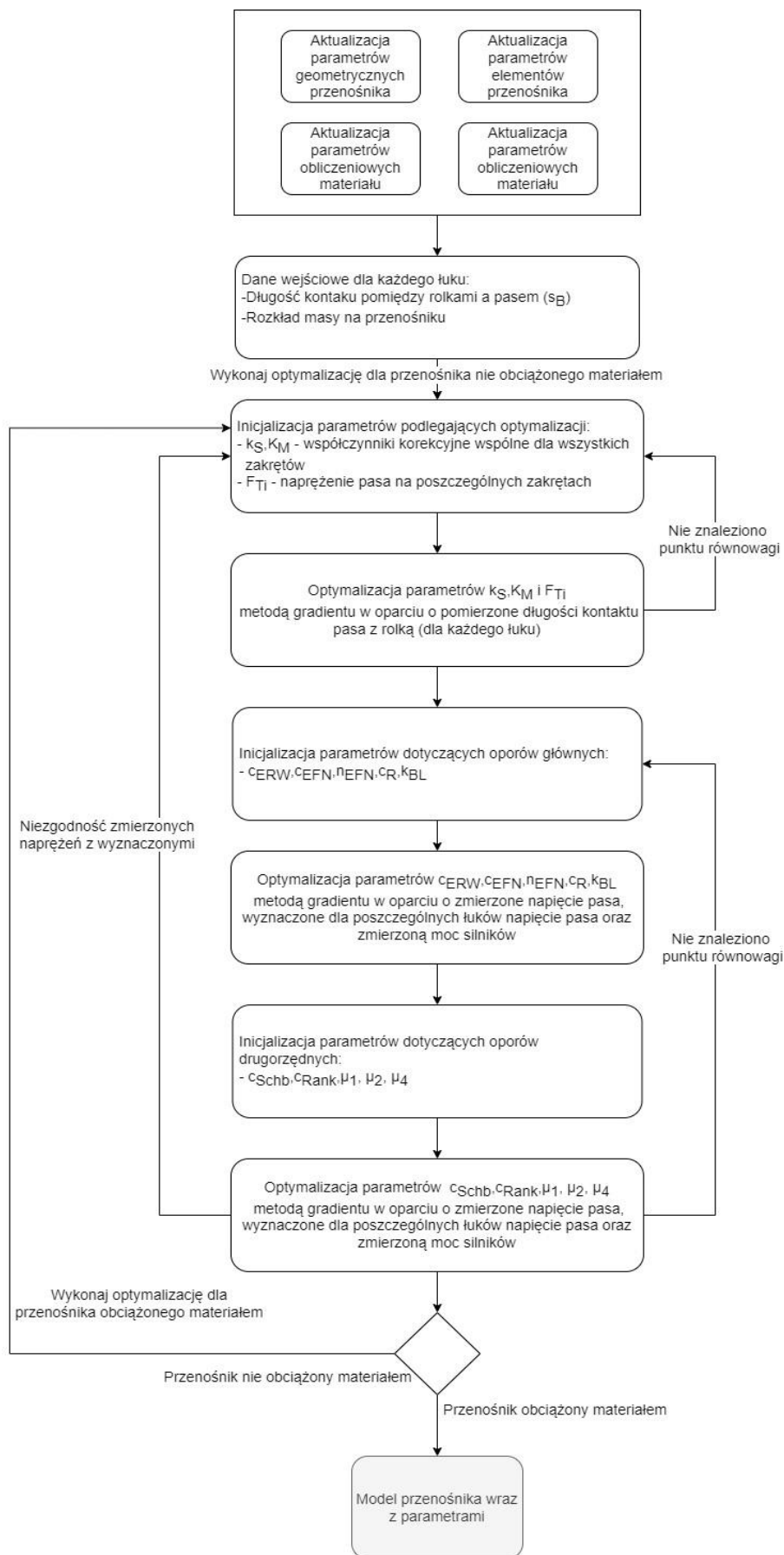
7.2. Strategia dopasowania

Strategia dopasowania jest autorską metodą pozwalającą na dopasowanie obliczeń analitycznych modelu do rzeczywistych danych po miarowych elementach przenośnika.

Parametrami podlegającymi dopasowaniu są wszystkie dane wejściowe do obliczeń będące współczynnikami zależnymi od danych katalogowych elementów oraz wszelkich innych współczynników dobranych podczas etapu projektowania na podstawie założeń. Wybór parametrów zależy od przyjętej metody obliczeniowej i może się różnić w zależności od projektu konkretnej instalacji przenośnika. Natomiast niezależnie od wybranej metody obliczeniowej parametry można podzielić na trzy grupy: wpływające na opory główne, wpływające na opory drugorzędne oraz parametry związane z obliczeniami przesunięcia taśmy. W punktach 7.2.1. oraz 7.2.2. przyjęto dopasowanie parametrów opisanych w punkcie 6 a dotyczących opisanej metody oporów jednostkowych.

7.2.1. Pomiary przesunięcia taśmy, bębna napinającego oraz mocy chwilowej silników

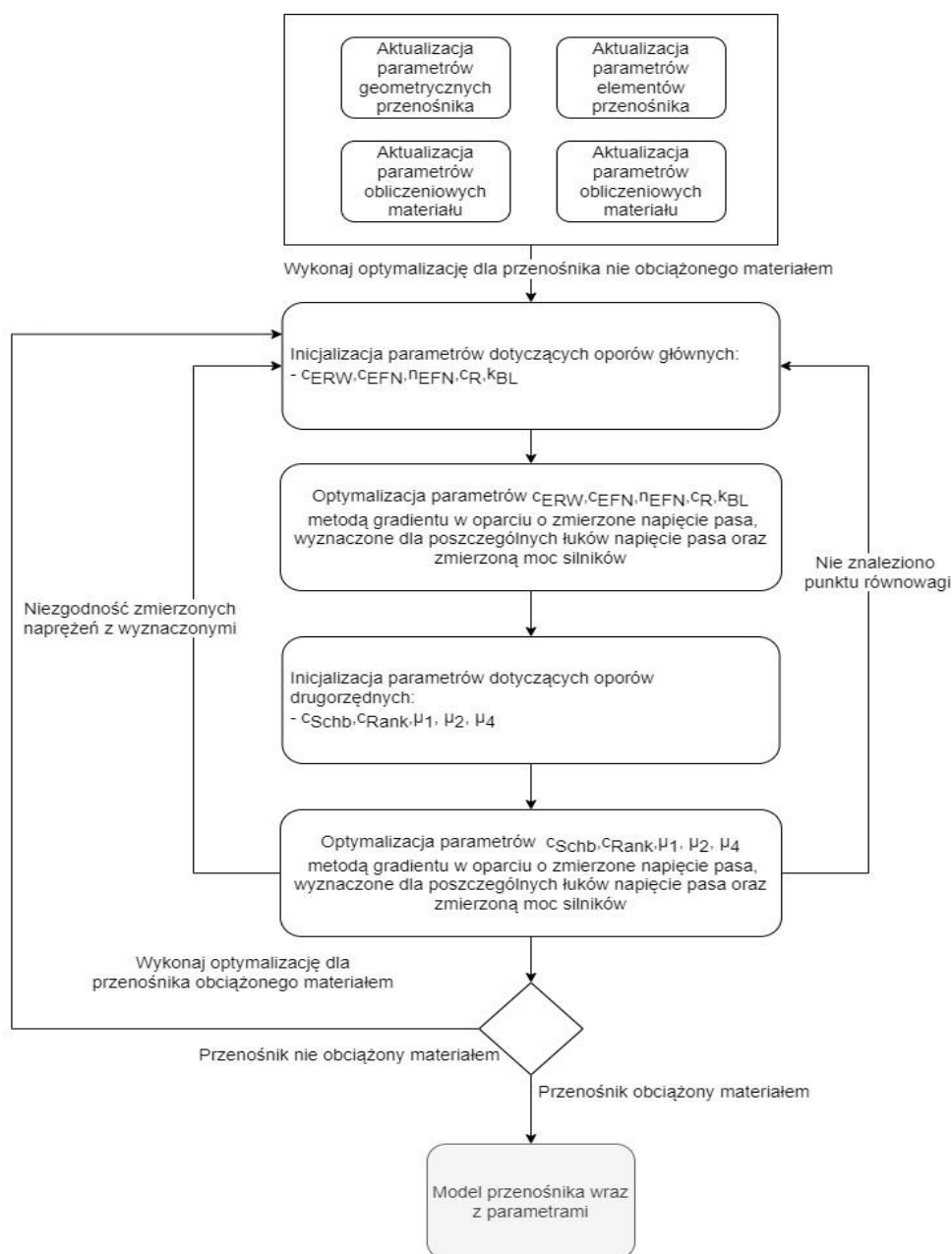
Algorytm dopasowania modelu w przypadku pomiarów przesunięcia taśmy oraz bębna napinającego oraz mocy chwilowej jest najdokładniejszą metodą przedstawioną. Propozycja dopasowania opiera się w pierwszej kolejności na dopasowaniu parametrów związanych z przesunięciem taśmy. W tym przypadku mamy możliwość dopasowania przypadków jednostkowych, a przez to minimalizacji oddziaływania pozostałych elementów przenośnika. Parametrem łączącym dany fragment z całym modelem jest naprężenie taśmy na danym łuku. Jak zostało pokazane w punkcie 6 naprężenia na sekcjach mają bezpośrednio wpływ na wartości oporów i naprężeń na sekcjach sąsiednich. W celu minimalizacji ryzyka znalezienia jednego z minimów lokalnych zamiast globalnego zaproponowano w pierwszej iteracji przeprowadzenie dopasowania na podstawie przenośnika bez obciążenia, tak aby wyeliminować wpływ materiału na parametry z nim nie związane, które w kolejnych krokach będą użyte jako parametry inicjalizacyjne. W kolejnych krokach głównej pętli iteracji proponuje się dalsze kroki dopasowania w oparciu o naprężenia taśmy na poszczególnych zakrzywionych sekcjach. Dzięki takiemu podejściu zyskujemy więcej punktów kontrolnych niż w przypadku braku dostępu do danych odnośnie przesunięcia taśmy (przypadek opisany w punkcie 7.2.2.). W ramach następnych kroków proponuje się w pierwszej kolejności określić parametry związane z oporami głównymi, ponieważ opory główne posiadają największy wpływ na wartości naprężeń a następnie przeprowadzić dopasowanie parametrów związanych z oporami drugorzędnymi. Procedura została przedstawiona na rysunku nr 7.2.



Rysunek 7.2 Procedura dopasowania w oparciu o pomiary przesunięcia taśmy.

7.2.2. Pomiary bębna napinającego oraz mocy chwilowej silników

W przypadku ograniczonej ilości pomiarów i braku dostępu do pomiarów przesunięcia taśmy bądź w przypadku braku występowania zakrętów na trasie istnieje możliwość skorzystania z procedury uproszczonej, a dokonanej wyłącznie na podstawie pomiarów mocy chwilowej silników oraz bębna napinającego. Procedura ta jest analogiczna do opisanej w punkcie 7.2.1. jednakże nie posiada ona dopasowania opartym na pomiarach przesunięcia taśmy, a co za tym idzie wartości naprężeń na poszczególnych zakrzywionych odcinaka.



Rysunek 7.3 Procedura dopasowania w oparciu o pomiary bębna napinającego i mocy silników.

8. Architektura systemu

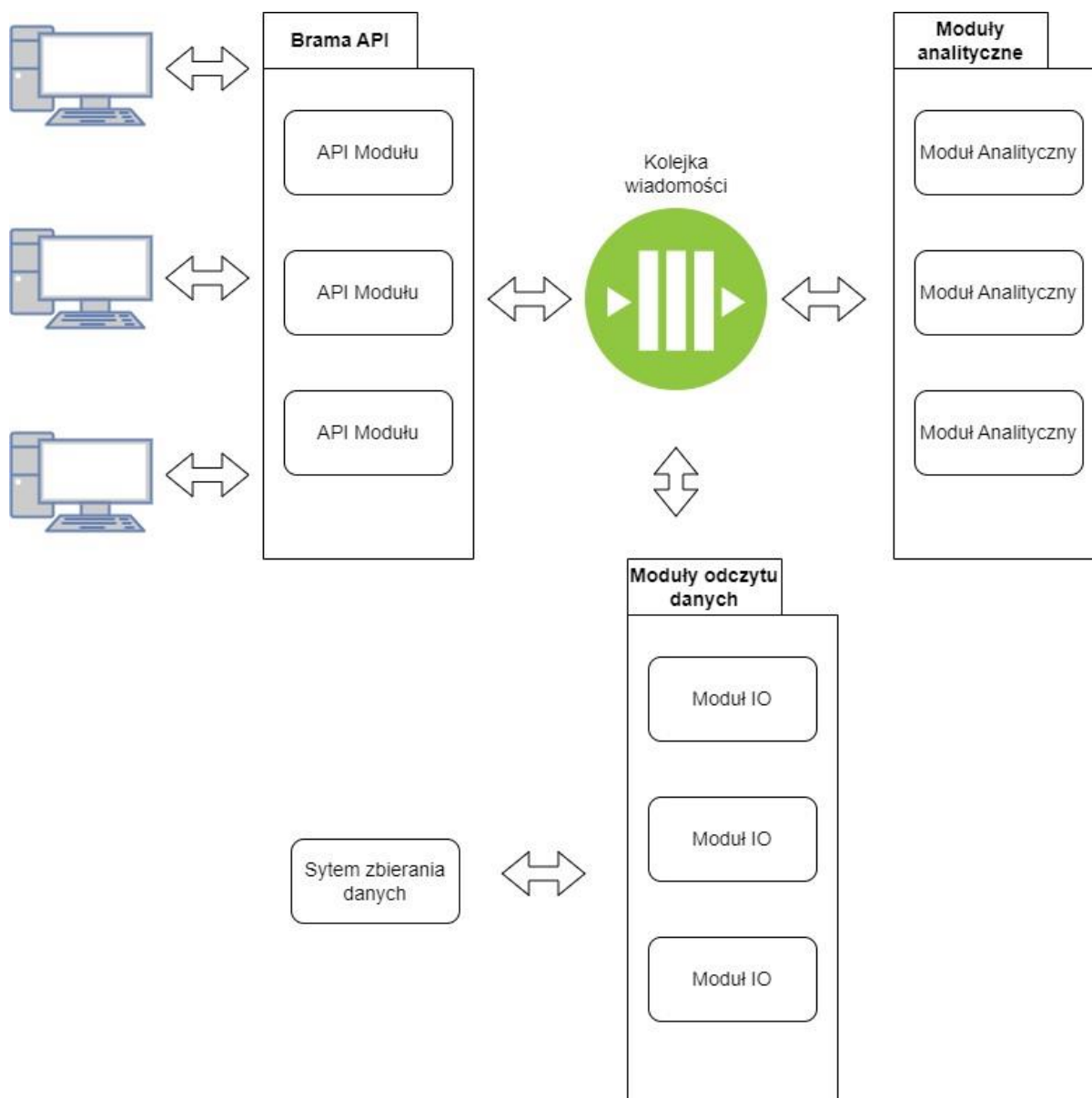
Architektura systemu jest traktowana w rozważaniach jako architektura oprogramowania rozumiana jako szereg decyzji projektorowych oraz organizacja i zachowanie wszystkich elementów systemu informatycznego mających na celu realizację postawionych celów [x1].

System został zaprojektowany tak aby zapewnić:

- skalowalność,
- rozszerzalność,
- wydajność,
- obsługę rozproszonych źródeł danych,
- obsługę istniejących oraz nowopowstałych instalacji,
- maksymalne bezpieczeństwo danych,
- łatwą możliwość nadzorowania i dostarczenia klientowi rezultatów.

W celu zapewnienia skalowalności i wydajności systemu zaproponowano architekturę opartą na mikroserwisach oraz zewnętrznych modułach posiadających ze sobą wspólną metodę komunikacji. Przez termin architektura mikroserwisów rozumiane jest styl tworzenia oprogramowania oparty na tworzeniu małych niezależnych serwisów posiadających ze sobą możliwość komunikacji za pomocą lekkich protokołów komunikacyjnych [86]. Ze względu na stosunkowo łatwą możliwość zwiększania ilości serwisów przetwarzających zapewnione jest wymaganie co do skalowalności i wydajności. Natomiast z taką samą łatwością można dodawać zupełnie nowe serwisy pozwalające rozszerzać źródła danych bądź możliwości przetwarzania zapewniono wymagania co do rozszerzalności i obsługi rozporozszonych źródeł danych. Dodatkowo dzięki tworzeniu nowych modułów istnieje możliwość elastycznej obsługi zarówno nowych jak i istniejących przenośników.

W celu zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa danych jak i algorytmów obliczeniowych zdecydowano o umieszczeniu modułów na zabezpieczonych serwerach oraz dostarczaniu rozwiązań na zasadach "oprogramowania jako usługa" (ang. "Software as a service", w skrócie SaaS). Idea SaaS [87] polega zgodnie z definicją na dostarczaniu użytkownikom aplikacji uruchomionej na serwerach bez konieczności instalacji oprogramowania na komputerach lokalnych.



Rysunek 8.1 Schemat architektury systemu.

Architektura systemu od strony organizacji wewnętrznej została podzielona na kilka warstw:

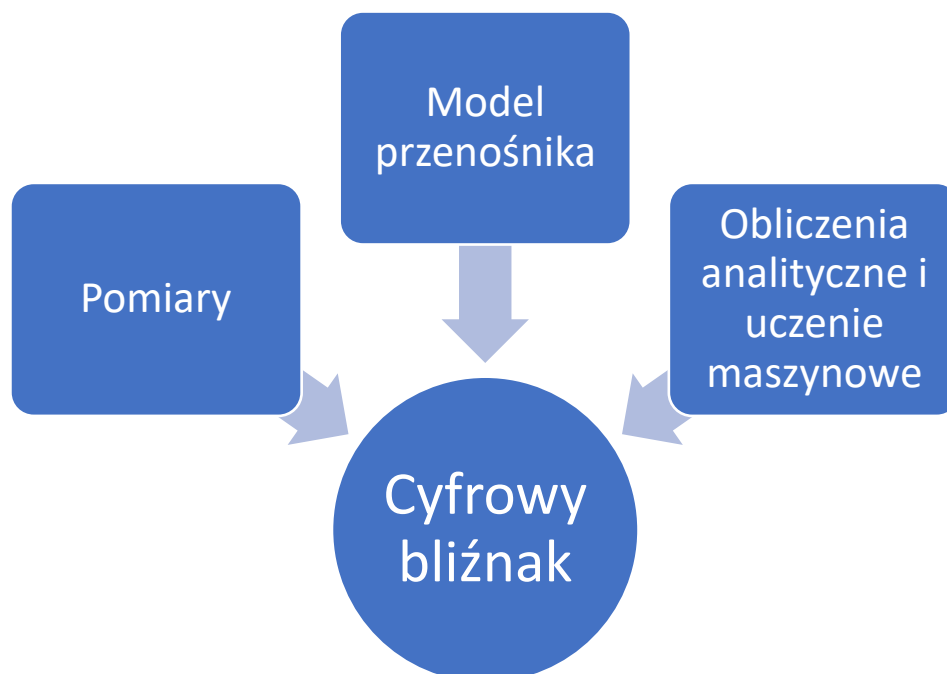
- Moduły odczytu danych (Moduły IO) - odpowiedzialne za dostarczanie informacji z warstwy sprzętowej oraz innych źródeł danych tj. interfejsy IoT oraz innych zewnętrznych źródeł danych w tym w szczególności z modułów odpowiedzialnych za zbieranie i przechowywanie danych.
- Kolejka wiadomości – warstwa pośrednicząca służąca do wymiany wiadomości pomiędzy komponentami.
- Moduły analityczne – warstwa zawierająca właściwe obliczenia analityczne, moduły związane ze sztuczną inteligencją oraz przetwarzająca informację na potrzeby prezentacji dla użytkownika.

- Warstwa interfejsu (Brama API) pomiędzy modułami o analitycznymi a interfejsem użytkownika, służąca standaryzacji dostępu.
- Warstwa aplikacji klienckich odpowiedzialna za prezentacja danych dla użytkowników oraz za interakcję z nimi.

9. Cyfrowy bliźniak przenośnika taśmowego

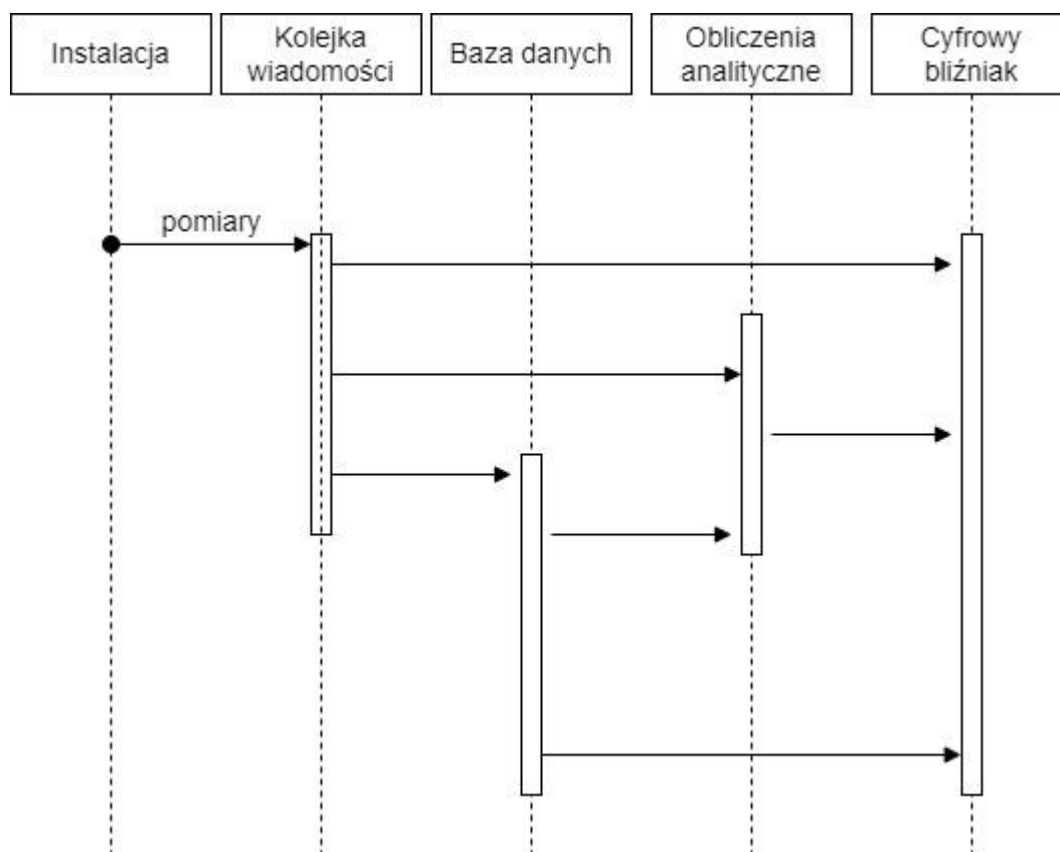
Idea cyfrowego bliźniaka jako części koncepcji Przemysłu 4.0 została opisana w punkcie 2.1. Zgodnie z nią głównym jego celem jest zbudowanie odwzorowania fizycznego przenośnika z modelem cyfrowym oraz zapewnienie wymiany danych.

Implementacja tej koncepcji w przypadku przenośnika taśmowego napotyka na pewne trudności. Podstawowym problemem, który należy rozwiązać podczas tworzenia cyfrowego bliźniaka jest brak efektywnej ekonomicznie możliwości opomiarowania wszystkich elementów przenośnika, a następnie zapewnienia ciągłości działania zamontowanych czujników. Część elementów jest względnie łatwa do monitorowania, ponieważ są umieszczone z kluczowych miejsc instalacji tzn. zlokalizowane są na początku bądź końcu przenośnika tj. np. silniki. Wyzwaniem jest natomiast monitorowanie elementów, które są umieszczone wzdłuż trasy tj. np. krążniki. Występujące metody posiadają ograniczenia związane z zbyt dużym kosztem takiego monitoringu bądź ograniczeniami funkcjonalnymi. Z powyższych powodów proponuje się zastosowanie rozwiązania hybrydowego łączącego w sobie trzy główne elementy tj. opomiarowanie elementów przenośnika, model geometryczny i parametryczny przenośnika oraz obliczenia analityczne połączone z elementami uczenia maszynowego. Obliczenia analityczne i uczenie maszynowe niezbędne jest w celu uzupełnienia luk występujących w pomiarach, a mających istotny wpływ na ocenę stanu przenośnika.



Rysunek 9.1 Elementy składowe cyfrowego bliźniaka.

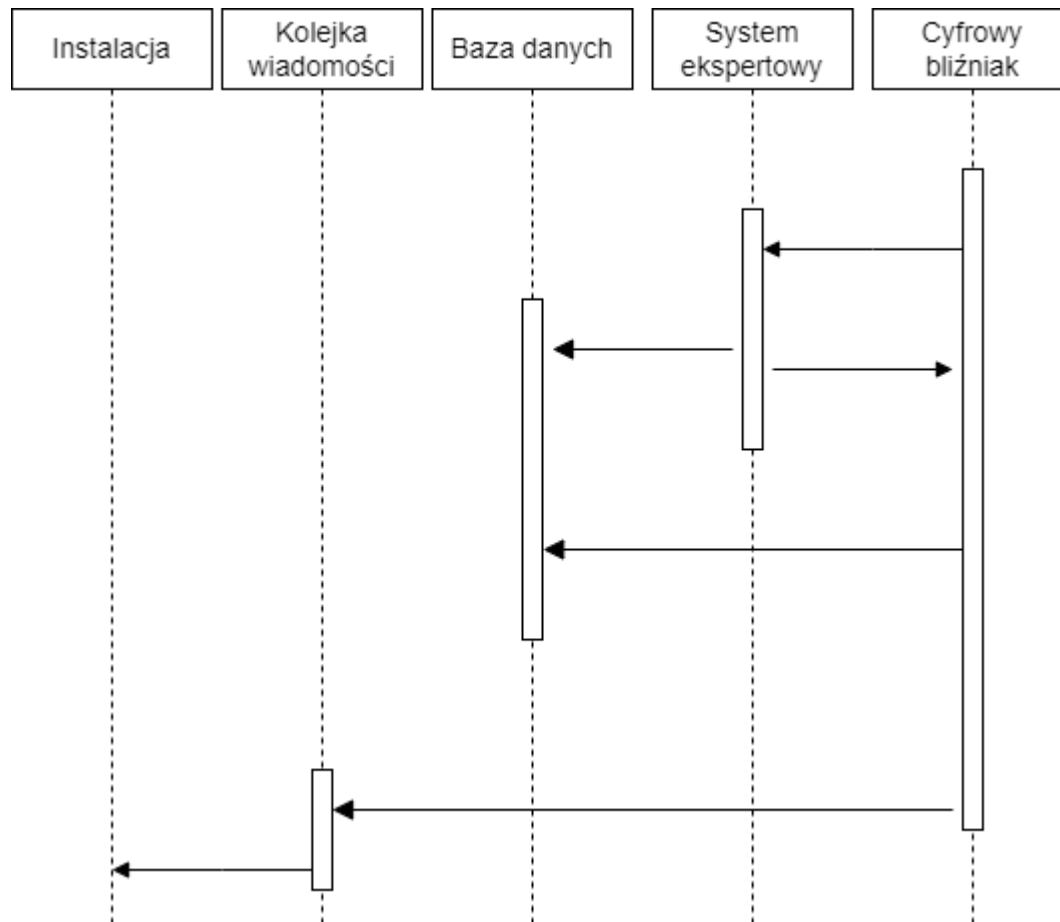
Schematyczny przepływ informacji pomiędzy komponentami został zaprezentowany na rysunku 9.2. Jest to przejście od instalacji poprzez system zbierania danych, obliczenia analityczne, aż do instancji cyfrowego bliźniaka. W tak przedstawionym schemacie systemu składającemu się na cyfrowego bliźniaka pomiary przesyłane są za pomocą systemu klasy IoT do kolejki wiadomości, a następnie do bazy danych (punkt 4 pracy). Jednocześnie dane pomiarowe aktualne i historyczne pobrane z bazy danych przekazywane są do systemu obliczeń analitycznych i uczenia maszynowego. Całość zebranych danych tj. aktualne pomiary przenośnika, historyczne dane i ich agregacje z bazy danych oraz rezultaty obliczeń analitycznych przekazywane są do cyfrowego bliźniaka posiadającego od tego momentu pełną informację na temat aktywności przenośnika. Całość została uzupełniona o model geometryczny i parametryczny przenośnika dając możliwość prezentacji i oceny całościowej monitorowanej instalacji.



Rysunek 9.2 Przepływy informacji od instalacji do cyfrowego bliźniaka.

Posiadając model cyfrowego bliźniaka uzyskujemy możliwość tworzenia systemów ekspertowych, które następnie mogą korzystać z zebranych danych. Zaproponowane systemy ekspertowe, rozszerzające możliwości systemów diagnostycznych niezbędnych w celu utrzymania sprawności przenośnika, zostały opisane w punkcie nr 10. Dodatkową korzyścią jest możliwość zbudowania w oparciu o istniejącą komunikacji od cyfrowego

bliźniaka do przenośnika i sterowania jego parametrami w zależności od potrzeb i oczekiwań klienta. Schemat komunikacji od cyfrowego bliźniaka do przenośnika został przedstawiony na rysunku 9.3.



Rysunek 9.3 Przepływy od cyfrowego bliźniaka do instalacji.

10. Przewidywanie ryzyka awarii

Przewidywanie ryzyka awarii jest częścią idei Przemysłu 4.0. Przewidywanie awarii jest możliwe pod warunkiem posiadania wszystkich niezbędnych danych. W poprzednich punktach pracy zostały opisane metody ich pozyskiwania, czyli budowania modelu, zbierania danych z czujników, obliczeń analitycznych oraz na końcu metod dopasowania modelu teoretycznego do rzeczywistej instalacji. Po zebraniu wszystkich w/w elementów możliwe jest wykonanie zaproponowanych poniżej metod.

10.1. Przewidywanie wymaganej mocy silników

Jedną z najważniejszych danych wejściowych do obliczeń analitycznych przenośnika jest moc z jaką w danym momencie pracują silniki. Moc ma bezpośrednie przełożenie na moment obrotowy, a następnie na naprężenia taśmy. Aby w pełni oszacować

10.1.1. Uczenie maszynowe

Uczenie maszynowe (ang. Machine learnig) jest technologią, a w zasadzie grupą technologii, której zadaniem jest doskonalenie działania algorytmów poprzez implementację procesu uczenia. Uczenie algorytmów polega na dopasowywaniu modeli na podstawie zestawu danych przygotowanych do tego procesu. Zestaw typowych zadań postawionych przed algorytmami uczenia maszynowego to:

- Regresja – zestaw metod do prognozowania wartości na podstawie danych wejściowych oraz uprzednio przygotowanego modelu dopasowanego podczas procesu uczenia pod nadzorem.
- Klasyfikacja – zestaw metod do klasyfikacji rekordów na podstawie danych wejściowych oraz uprzednio przygotowanego modelu dopasowanego podczas procesu uczenia pod nadzorem.
- Grupowanie – zestaw metod służących do pogrupowania danych wejściowych. Algorytmy te należą do grupy nienadzorowanych, ponieważ ich przeznaczeniem jest znalezienie cech wspólnych z grupy danych.

W przypadku zadania polegającego na przewidywaniu wymaganej mocy silników grupą algorytmów która została wzięta pod uwagę jest grupa algorytmów regresji. W ramach grupy występuje wiele metod, które zostały sprawdzone pod kątem jakości przewidywania wyników dla interesującego nas przypadku. Do najważniejszych algorytmów regresji należą:

- Regresja liniowa – jedna z najprostszych a zarazem najpopularniejszych metod regresji. Podstawą jest założenie liniowej zależności pomiędzy zmiennymi zależnymi i

niezależnymi, czyli innymi słowy zmiana jednej wartości jest proporcjonalna do zmian innych wartości.

- Regresja wielomianowa – wykorzystywana jest do modelowania zależności nieliniowych. Polega na wykorzystaniu funkcji wielomianowej w celu zobrazowania bardziej złożonych zależności niż w przypadku regresji liniowej.
- Regresja z wektorem wspomagającym (SVR) – jest regresją w wykorzystanie hiperpłaszczyzny i wektorów wspomagających. Bardziej szczegółowo została opisana poniżej.
- Regresja na podstawie drzewa decyzyjnego – regresja odbywa się poprzez zbudowanie drzewa decyzyjnego, składającego się z tzw. węzłów i gałęzi. Budowanie drzewa odbywa się na podstawie zestawu danych wejściowych.
- Regresja na podstawie lasu losowego – regresja polega na szacowaniu wartości na podstawie wielu drzew decyzyjnych. W tym przypadku drzewa decyzyjne powstają tylko z fragmentu danych wejściowych.

Na podstawie badań została wybrana metoda regresji z wektorem wspomagającym (SVR). Rezultaty jakości przewidywania zostały opisane w dalszej części pracy. Spośród każdego z rozważanych algorytmów SVR charakteryzuje się najwyższą jakością wartości przewidywanych dla badanych danych wejściowych. Metoda ta została również wykorzystana przez Hu [88] w analizie awarii występujących na przenośnikach taśmowych.

Algorytm SVR jest uogólnieniem problemu klasyfikacji opisanego przez Vapnika [24]. Algorytm ten charakteryzuje się dużą dokładnością predykcji wartości nieliniowych. Wykazano również, że skutecznie sprawdza się przy estymacji danych szeregów czasowych [25] [24]. SVR opiera się na algorytmie klasyfikacji z wektorem wspomagającym (SVM). Algorytm przystosowano do regresji poprzez wprowadzenie obszaru niewrażliwego na zmiany wartości zmiennych zależnych. Obszar ten nazywany w ramach algorytmu jest tubą a jego schematyczne działanie przedstawiono na rysunku 10.1. Algorytm SVR wymaga również minimalizacji tuby. Rozwiązanie problemu minimalizacji przedstawione jest za pomocą wzoru 10.1:

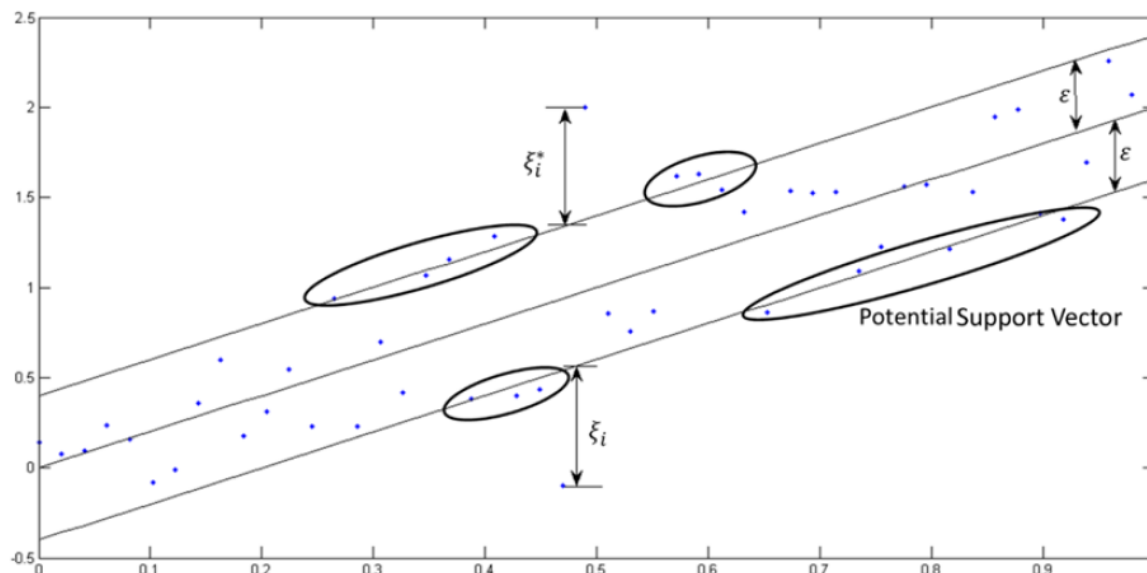
$$\text{MIN} \frac{1}{1} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n |\xi_i|, \quad (10.1)$$

gdzie $\|w\|$ jest rozmiarem wektora normalnego do aproksymowanej powierzchni, a ξ_i jest zmienną luzu, która oznacza odległość i-tej wartości od wyznaczonej rury. Wyrażenie w (10.2) należy traktować nierozdzielnie z następującymi ograniczeniami:

$$|y_i - w_i x_i| \leq \epsilon + |\xi_i|, \quad (10.2)$$

gdzie ϵ jest rozmiarem tuby.

Biorąc pod uwagę, że dane podlegające estymacji są nieliniowe, jako jądro algorytmu SVR wykorzystano radialną funkcję bazową (RBF). Zachowanie funkcji jądra RBF jest podobne do rozkładu Gaussa. Funkcja oblicza odległość pomiędzy dwiema próbkami X_1 i X_2 , skorygowaną za pomocą dowolnego parametru σ . Jądro RBF można przedstawić w następujący sposób:



Rysunek 10.1 Opis algorytmu SVR [26].

10.1.2. Przygotowanie danych

Przygotowanie danych na potrzeby uczenia maszynowego jest niezbędnym etapem trenowania wszystkich modeli. W każdym przypadku trenowania należy rozpatrzyć wszystkie możliwe aspekty mogące mieć wpływ na poprawność przewidywania stworzonego modelu. Wynika to z faktu, że algorytmu oparte są na założeniach matematycznych i generują lepsze rezultaty w oparciu o lepsze dane treningowe. Tak więc jakość danych jest kluczowa, a właściwy dobór i interpretacja danych mogą spowodować odpowiedni wzrost dokładności przewidywanych wartości. Pierwszym krokiem w przygotowaniu danych jest wyodrębnienie wartości charakteryzujących się zależnością od tych podlegających estymacji. Dane dostarczane przez czujniki umieszczone na badanym przenośniku taśmowym posłużyły do określenia wymaganej mocy silnika z największą możliwą dokładnością. W oparciu o analizę sił działających na przenośniku oraz dostępność danych pomiarowych wybrano następujące zbiory danych pomiarowych:

- temperatura otoczenia [K],
- napięcie taśmy transmisyjnego [N],
- prędkość transportu [m/s],

Dodatkowo na podstawie prędkości załadunku oraz prędkości transportu obliczono rozkład materiału na przenośniku dla 61, 14 lub 3 sekcji.

Podczas procesu poprawiania jakości danych często stosuje się także kilka opracowanych metod. Pierwszą jest czyszczenie danych, polegające na rozwiązaniu problemu brakujących danych i występowania danych zaszumionych, czyli takich których wartości nie odpowiadają w pełni danemu procesowi bądź wpływ na ich wartości miały błędy lub środowisko zewnętrzne. W przypadku danych generowanych na potrzeby pracy problem ten został rozwiązany na poziomie pobierania danych z bazy danych Elastisearch, poprzez odpowiednie filtry oraz uśrednianie wartości w grupach. Ponieważ każdy z czujników systemu dostarczał dane asynchronicznie w kilkusekundowych odstępach. Dane następnie zapisano w bazach danych. Aby dokładnie określić szacunkowe wartości, dane z czujnika uśredniano w odstępach 10-sekundowych. Następnie na podstawie wartości prędkości transportu i prędkości załadunku określano ilość materiału na przenośniku w każdym zadanym przedziale 10-sekundowym.

Kolejnym korkiem procedurę poprawy jakości danych jest ich transformacja. W ramach pracy kluczową procedurą była normalizacja danych treningowych. Procedura normalizacji polega na przeskalowaniu wartości danych treningowych na zakres od 0 do 1. Konieczność procedury normalizacji wynika z dużego rozrzutu wartości danych wejściowych oraz z faktu, iż wybrany algorytm uczenia maszynowego SVR jest wrażliwy na znaczne rozrzuty danych i pozwala osiągać dużo lepsze wyniki przewidywania w oparciu o dane znormalizowane. Redukcja

Przygotowane dane wejściowe charakteryzowały znacząco dużą liczbą wymiarów. Większość z nich (61 z 64) wynikała z danych dotyczących ilości materiału transportowanego na sekcjach przenośnika. Podczas badań przeprowadzono procedurę redukcji wymiarów, aby zwiększyć jakość procesu uczenia maszynowego. Celem tej procedury jak było wspomniane powyżej było zapewnienie dużej dokładności przewidywanych wartości wraz z obniżeniem złożoności obliczeń. Liczbę wymiarów zmniejszono poprzez dostosowanie liczby odcinków pomiarowych poprzez:

- obliczeniowe łączenie odcinków o podobnej geometrii,
- zwiększenie długości odcinków, na które podzielony jest przenośnik taśmowy.

Jak opisano wcześniej, taśmę przenośnika podzielono w celu określenia ilości załadowanego na nią materiału. Zastosowano następujące podejścia do podziału geometrycznego:

- 61 odcinków – podejście to oprócz ich intensywności uwzględniało zmiany kierunku orientacji poziomej i pionowej, ale nie charakteryzowało się redukcją wymiarów.
- 14 odcinków – wymiary tego wariantu zmniejszono poprzez grupowanie sąsiadujących ze sobą odcinków według nachylenia danej sekcji. Ponieważ odcinki są grupowane wariant ten nie oddaje w tak dużym stopniu zmian orientacji pionowej, jak wariant z 61 sekcjami.
- 3 sekcje – wymiary danych wejściowych dla tego wariantu zmniejszono poprzez pogrupowanie sekcji na trzy typy – poziome, wznoszące i opadające.

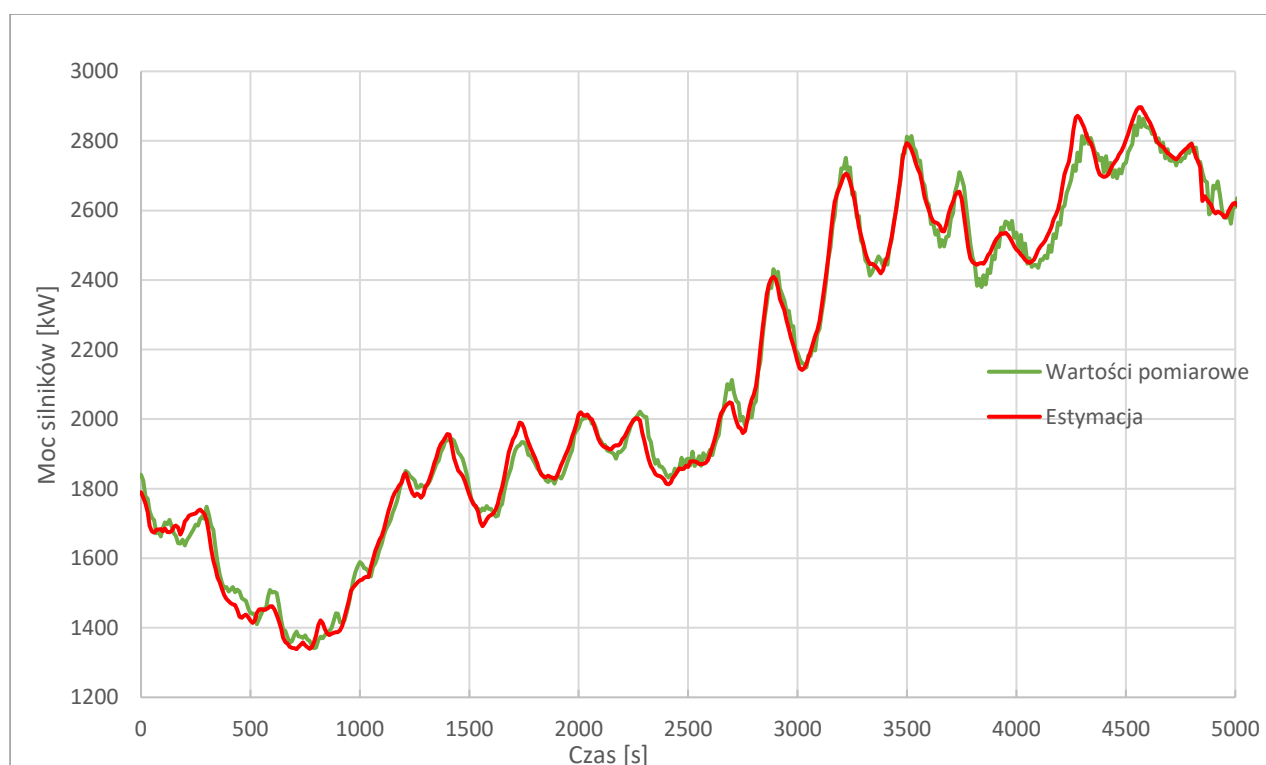
Na potrzeby wyboru odpowiedniej metody badania przeprowadzono dla każdego z trzech zaproponowanych podejść podziałowych.

10.1.3. Estymacja mocy silników

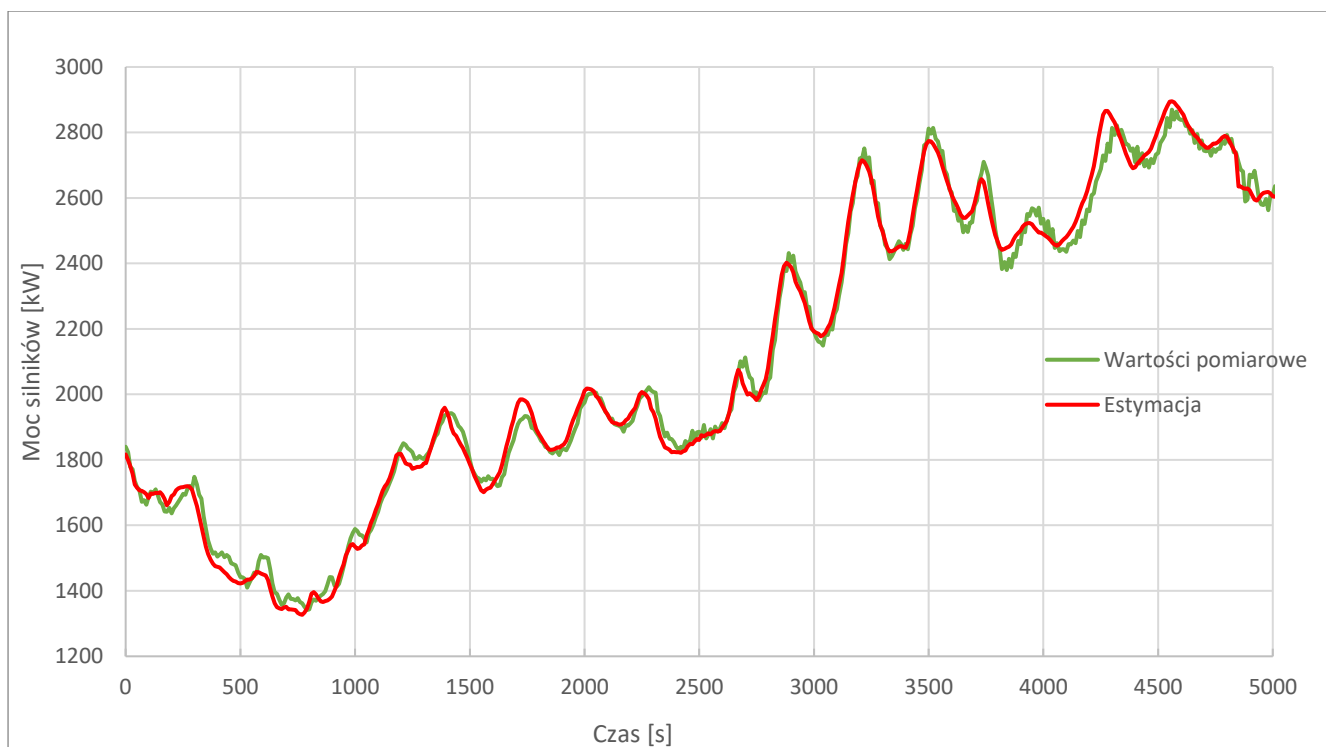
Podstawowym celem badania jest ocena wpływu rozkładu masy materiału transportowanego przenośnikiem na moc wymaganą przez przenośnik oraz określenie możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego do szacowania wymaganej mocy i wykrywania pomiaru mocy silnika anomalie. Na potrzeby badania wykorzystano dane pomiarowe z okresu od 01.07.2021 r. do 31.07.2021 r. Dane te przygotowano zgodnie z podrozdziałem 10.1.2. Wykorzystane metody uczenia maszynowego opisano w podrozdziale 10.1.1.

Dane dotyczące mocy napędów zagregowano i zaprezentowano całościowo dla wszystkich siedmiu silników zainstalowanych na urządzeniu. Biorąc pod uwagę cel pracy, badania skupiły się na oszacowaniu mocy przenośnika w okresie zasypywania przenośnika materiałem, czyli w okresie rozpoczynającym się w momencie rozpoczęcia załadunku przenośnika i kończącym się w momencie jego całkowitego zapełnienia. Schemat załadunku przenośnika w tym przypadku wynosił 600 t/h przez pierwsze 24 min (faza 1). Przez kolejne 16 min prędkość załadunku wzrosła do 1700 t/h (faza 2), a po tym okresie do 2400 t/h (faza 3). Maksymalna ilość materiału na przenośniku w tym przypadku wynosiła 1730 ton. Wyniki przedstawiono na rysunkach 10.4–10.12. Każdy wykres pokazuje ten sam segment danych – okres 5000 sekund – który zawiera najważniejsze zdarzenia związane z napełnieniem przenośnika materiałem, transportem materiału po nierównym terenie i napełnieniem taśmy. W rozpatrywanym okresie łączne wartości mocy silników wahały się od 134 MW do 285 MW. Najniższe wartości osiąga się przy przenośniku lekko obciążonym, a najwyższe przy dużym obciążeniu. Dane pomiarowe wskazują liczne skoki wartości. Piki takie powstają w wyniku wznoszenia się trasy przenośnika na danym odcinku przed opadaniem na kolejnym odcinku, jak pokazano na rysunku 3.1. Kiedy przenośnik zaczyna transportować materiał w pierwszej kolejności musi pokonać wzniesienia wynikające z geometrii trasy. Czyli rzędna początkowa danego odcinka jest mniejsza niż odpowiadająca jej rzędna końcowa. Powoduje to wzrost mocy silnika i uwidacznia się szczyt na wykresie wyników mocy silników. Efekt ten zostaje następnie zniwelowany w miarę przesuwania materiału po przenośniku ze względu na spadek trasy przenośnika. Podobny efekt uzyskuje się, gdy materiał jest najpierw transportowany w dół, a następnie w górę. Gdy przenośnik jest całkowicie wypełniony materiałem, efekty te znoszą się i przenośnik pracuje ze stałą mocą (warunki stacjonarne), która jest znacznie niższa od mocy chwilowej wymaganej w procesie napełniania przenośnika materiałem. Na rysunkach 10.2 i 10.3 przedstawiono wyniki estymacji z wykorzystaniem algorytmu uczenia maszynowego SVR dla podziału przenośnika na 61 odcinków uwzględniających zmiany orientacji pionowej i poziomej oraz 61 odcinków równych. Z

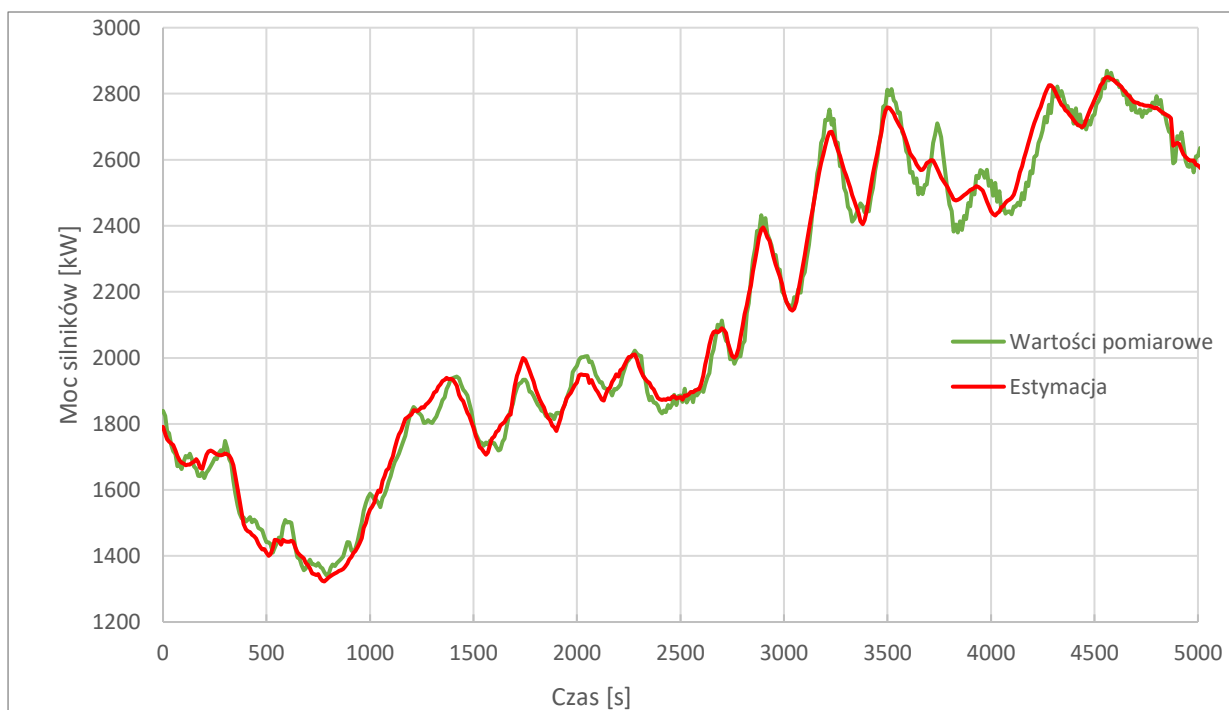
porównania wyniku, że szacunków dokonano z dużą dokładnością. Obserwację tę potwierdzają współczynniki determinacji dla każdego podejścia – wartości R^2 – które przedstawiono w tabeli 10.1. Wartości te są równie wysokie w obu przypadkach. Na rysunkach 10.4 i 10.5 przedstawiono analogiczne oszacowania w przypadku zmniejszenia liczby sekcji do 14. Na rys. 10.6 przedstawiono porównanie obu podejść i widać, że dokładność oszacowań jest większa w przypadku podziału taśmy przenośnika ze względu na jej geometrię. Niektóre sekcje wykazują wyraźnie gorsze wyniki. Dzieje się tak dlatego, że geometria trasy w obrębie danych odcinków ma istotny wpływ na moc napędu, a podział na równe odcinki nie jest w stanie odtworzyć tej zależności. Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być zwiększenie szczegółowości podziału tylko dla odcinków, w których dokładność estymacji znacząco maleje. Rysunki 10.7 i 10.8 przedstawiają szacunki wygenerowane w przypadku podziału przenośnika tylko na trzy sekcje. Na rysunku 10.7 przedstawiono wyniki podziału na odcinki rosnące, zstępujące i płaskie, natomiast na rysunku 10.8 przedstawiono wyniki podziału na trzy równe odcinki. Wyniki wskazują na znaczny spadek trafności estymacji; jednakże w dalszym ciągu podział z uwzględnieniem geometrii trasy zapewnia dokładniejsze szacunki. Potwierdzają to wartości współczynnika determinacji R^2 w tabeli 10.1. Dla porównania przeprowadzono eksperyment ze zredukowaną liczbą wymiarów za pomocą analizy głównych składowych (PCA). Wyniki przedstawiono na rysunkach 10.9 i 10.10 i wykazują mniejszą dokładność szacunków niż w przypadku analizy geometrii taśmy.



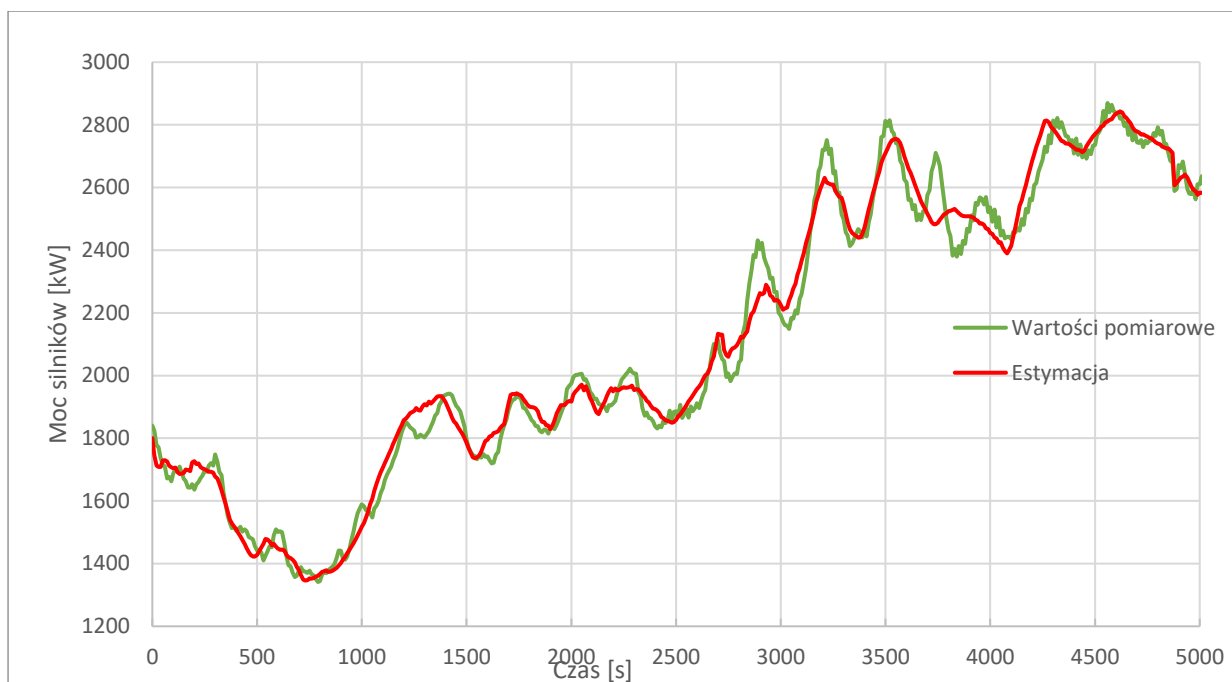
Rysunek 10.2 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 61 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy.



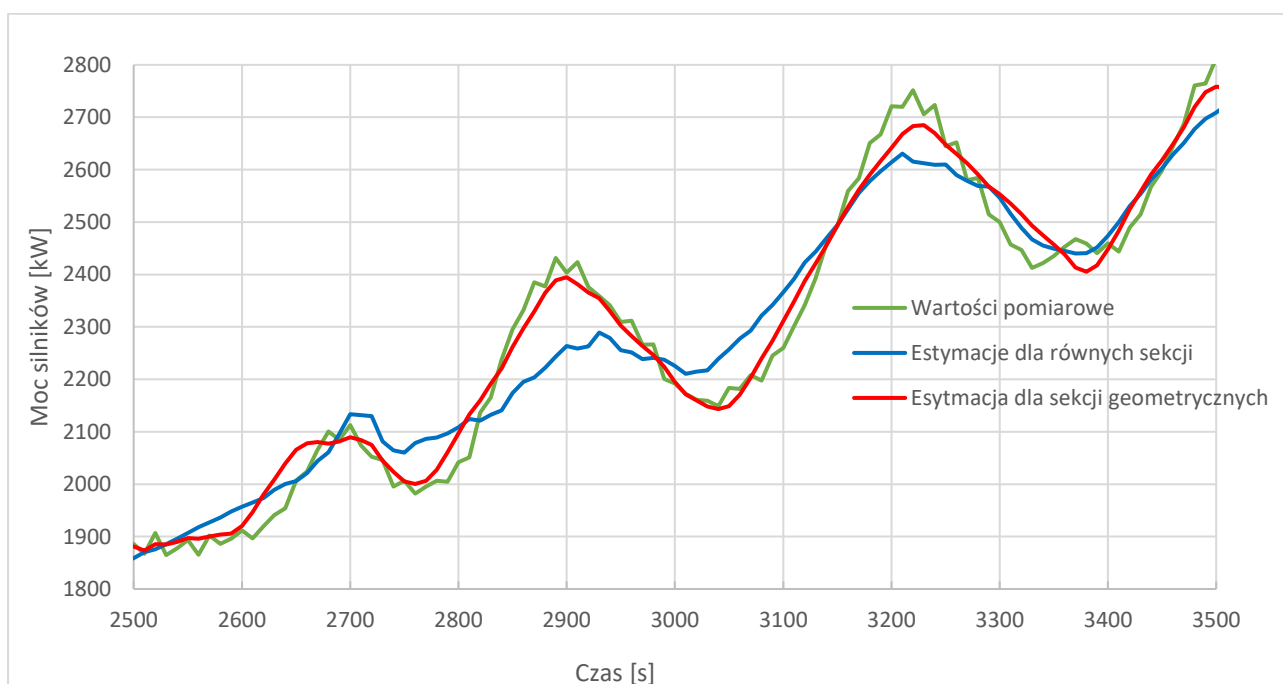
Rysunek 10.3 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 61 równych sekcji.



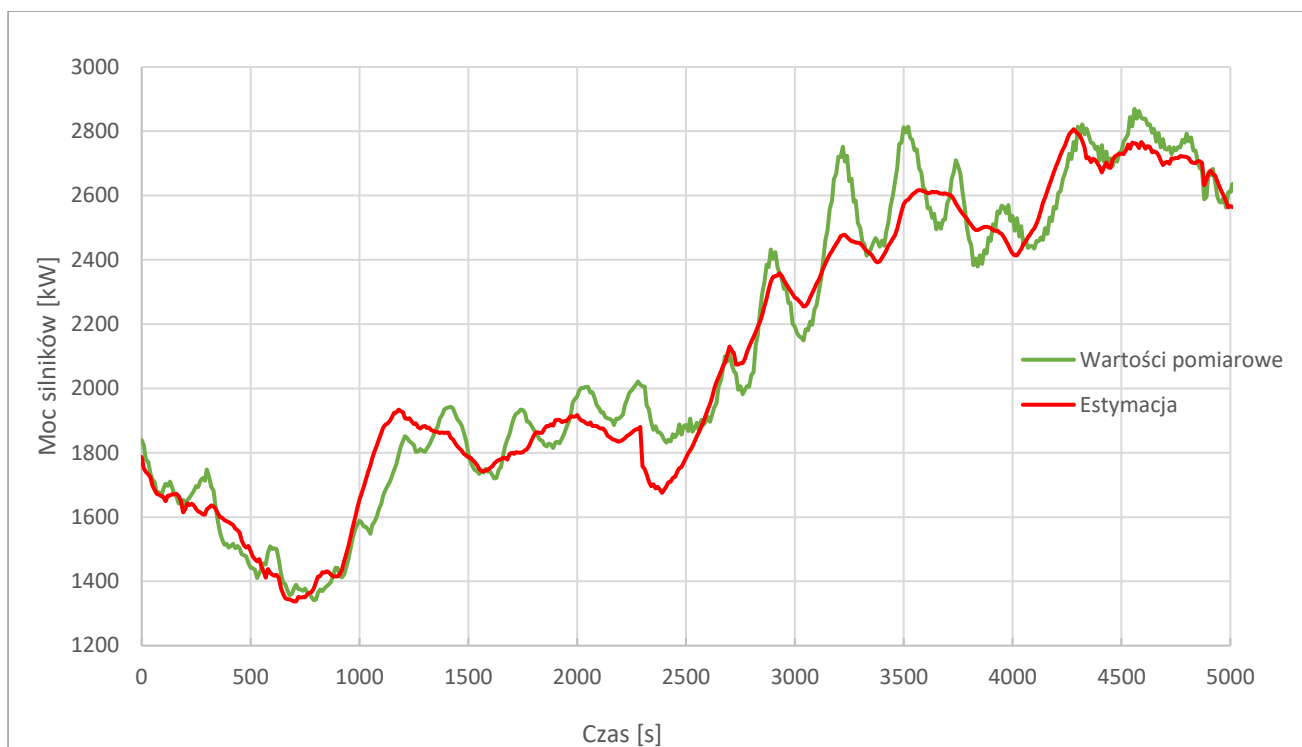
Rysunek 10.4 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 14 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy.



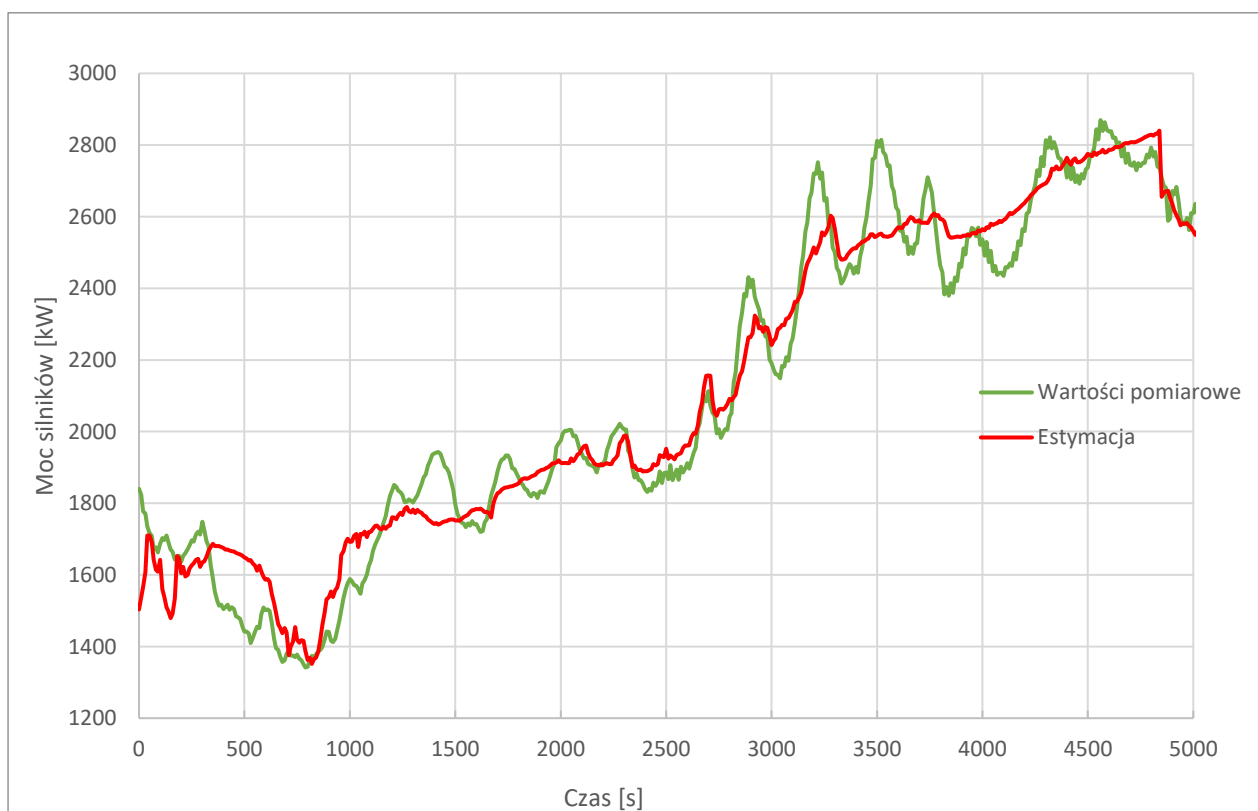
Rysunek 10.5 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 14 równych sekcji.



Rysunek 10.6 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 14 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy oraz 14 równych sekcji.



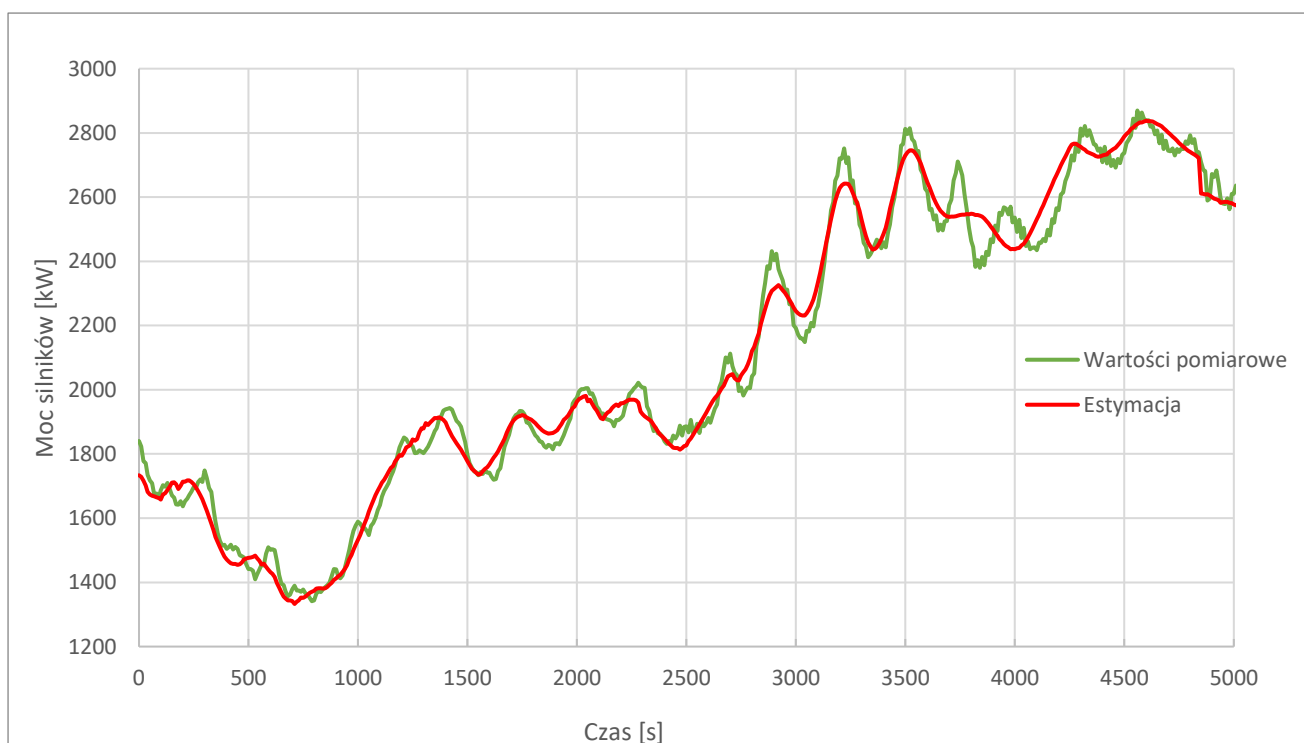
Rysunek 10.7 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 3 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy.



Rysunek 10.8 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 3 równych sekcji.



Rysunek 10.9 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 17 zmiennych niezależnych (dla sekcji geometrycznych) wyodrębnionych z użyciem algorytmu PCA.



Rysunek 10.10 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 17 zmiennych niezależnych (dla równych sekcji) wyodrębnionych z użyciem algorytmu PCA.

Metoda wyznaczania sekcji		Liczka zmiennych niezależnych			
		64	17 (a)	17 (b)	6(b)
Sekcje na podstawie geometrii	Współczynnik determinacji R^2	0,9933	0,9868	0,9913	0,9629
	Mediana błędu [kW]	25,0	34,8	25,4	58,3
	Błąd średni [kW]	20,9	27,0	23,4	48,3
	Błąd maksymalny [kW]	152,7	188,0	137,7	274,4
	Odchylenie standardowe [kW]	37,3	32,4	42,6	87,9
Równe sekcje	Współczynnik determinacji R^2	0,9932	0,9861	0,9843	0,9568
	Mediana błędu [kW]	25,4	37,4	38,5	61,9
	Błąd średni [kW]	20,2	29,6	30,7	51,1
	Błąd maksymalny [kW]	152,5	167,8	228,1	336,3
	Odchylenie standardowe [kW]	37,5	31,8	57,1	94,8

Tabela 10.1 Jakość szacowania dla (a) redukcji metodą PCA, oraz (b) redukcji na podstawie geometrii trasy.

Wartości współczynnik determinacji R^2 zawarte w Tabeli 10.1 pokazują, że najdokładniejszą możliwość oszacowania wartości wymaganej mocy silników zapewnia model oparty na kompletnym zestawie danych geometrycznych ($R^2 = 0,9933$). Niemniej jednak dokładność oceny jest niemal tak wysoka ($R^2 = 0,9932$), gdy taśma przenośnika jest podzielona na dużą liczbę równych długości. Takie zachowanie jest obserwowane, ponieważ podział przenośnika na 61 równych sekcji tworzy sekcje o długości w przybliżeniu 200 m. W takiej sytuacji odcinki są wystarczająco krótkie, aby zniwelować znacząco efekt zmian wysokości. Jednakże efekt w postaci spadku dokładności szacowania na podstawie równych sekcji jest podkreślony przez redukcję do 14 sekcji z zachowaniem 3 podstawowych parametrów. Jeśli 14 sekcji jest podzielonych na podstawie geometrii, nadal osiąga się wysoką jakość prognozowania ($R^2 = 0,9913$). Jednak, jeżeli przenośnik zostanie podzielony na 14 równych sekcji, dokładność szacowania znacząco spada ($R^2 = 0,9843$). Ta zależność jest nawet wzmocniona w przypadku podziału na trzy sekcje. Dla porównania, wskaźnik jakości prognozowania został również przedstawiony dla redukcji zmiennych przy użyciu algorytmu PCA. Znacznie gorsze wskaźniki jakości prognozowania osiągnęte są zarówno dla podziałów geometrycznych i równych i wynoszą odpowiednio 0,9868 i 0,9861. Przedstawione wyniki szacowania prowadzą do wniosku, że jeśli to możliwe, należy w pierwszej kolejności

zmniejszyć liczbę sekcji na podstawie geometrii taśmy przenośnika. Jeśli natomiast nie jest to możliwe, należy podzielić taśmę na wiele równych sekcji. Oczywiście pozostałe przypadki mogą nadal dawać użyteczne wyniki, pomimo ich niższej dokładności, a ich zastosowanie determinuje wymagania co do dokładności przewidywania.

Podsumowując wykrywanie anomalii podczas pracy przenośnika taśmowego ma ogromne znaczenie dla zapewnienia bezawaryjnej pracy urządzenia. Wykrycie wszelkich sygnałów zakłócających pozwala na zaplanowanie inspekcji na wczesnym etapie, co zmniejsza koszty przestoju i zmniejsza szkody spowodowane awarią. Metody uczenia maszynowego można wykorzystać do doboru odpowiedniej prędkości transportu w celu optymalizacji energii wykorzystywanej przez przenośnik. Techniki te pozwalają również na redukcję błędów szacowania wynikających ze zjawisk związanych z dynamiką przenośnika taśmowego. Niniejsze badanie wykazało, że uczenie maszynowe można wykorzystać do dokładnego przewidywania mocy silników przenośnika. Ponadto dzięki geometrycznemu podziałowi trasy przenośnika można wykryć anomalie, takie jak zwiększone opory transportu. Ponadto stopień zużycia instalacji można oszacować, oceniając wzrost oporu. Na koniec można oszacować obciążenia działające na urządzenie, a tym samym przewidzieć pozostały czas eksploatacji podzespołów. Niniejsze badanie wykazało również, że uwzględnienie geometrii trasy ma duży wpływ na dokładność szacowania wartości mocy podczas korzystania z algorytmu SVR. Ponadto zmniejszenie wymiarowości problemu przy uwzględnieniu geometrii trasy daje lepsze rezultaty niż przy użyciu algorytmu PCA. Wyniki podziału na dużą liczbę sekcji pokazują bardzo wysoką dokładność szacowania niezależnie od tego, czy uwzględniono geometrię trasy. Ponadto, aby zwiększyć dokładność szacowania, można zwiększyć liczbę sekcji uwzględnionych przez algorytm uczenia maszynowego. Przeprowadzone badania wykazały, że najlepsze wyniki uzyskuje się przy podziale na 61 sekcji. Jednak zmniejszenie liczby sekcji do 14, przy uwzględnieniu geometrii trasy, pozwala na utrzymanie wysokiej dokładności szacowania przy jednoczesnym zminimalizowaniu ilości danych wejściowych i złożoności obliczeniowej. Badania wykazały również, że zmniejszenie liczby sekcji do trzech nadal pozwala na dość wysoką dokładność szacowania i może być odpowiednie do użytku komercyjnego.

10.2. Wyznaczanie ryzyka obrotu taśmy

Ponieważ badany przenośnik jest dużą instalacją o skomplikowanej geometrii posiada on zwiększone ryzyko występowania zjawisk niepożądanych. Celem systemu wyznaczania ryzyka obrotu taśmy jest oszacowanie tego ryzyka i dopasowanie parametrów pracy przenośnika, tak aby zapewnić bezawaryjną pracę. System opiera się w tym przypadku na wykorzystaniu uczenia maszynowego w celu wyznaczenia przyszłych parametrów pracy, pomiarów parametrów przenośnika, obliczeń analitycznych i algorytmów wspomagających podejmowanie decyzji.

Procedura wyznaczanie ryzyka obrotu taśmy jest autorską propozycją, która została zaprezentowana w artykule naukowym [89].

10.2.1. Problem obrotu taśmy na badanym przenośniku

W testowanym przenośniku, pod pewnymi warunkami, występował problem z przewróceniem się taśmy na pierwszym odcinku w sekcji powrotnej taśmy. Na rysunku nr 10.11 przedstawiono kolejne etapy występowania opisywanej awarii. Diagnoza problemu wykazała, że przewrócenie się taśmy jest spowodowane nadmiernymi siłami przyłożonymi na początku i na końcu łuku. Ze względów technicznych nie jest możliwe zmierzenie naprężenia na całej długości przenośnika. Możliwość pomiaru ograniczona jest do czujników umieszczonych na kole pasowym służącym do wstępnego naprężania taśmy.

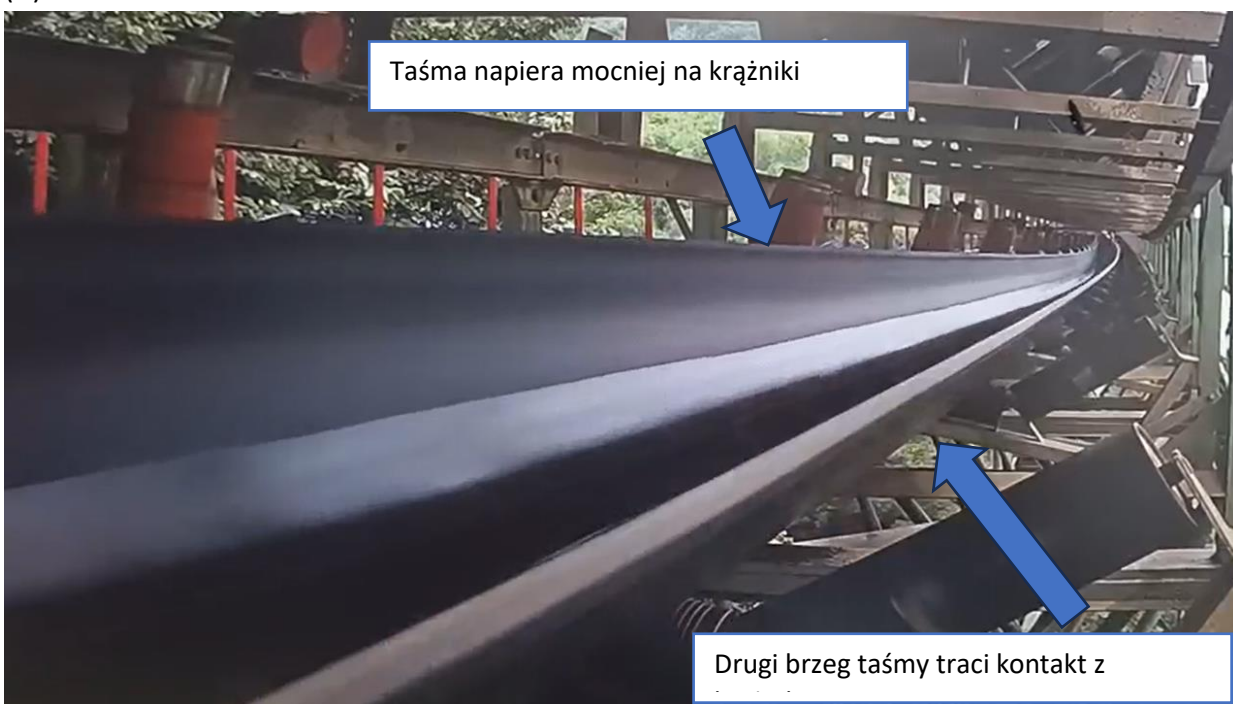
Bezpośrednia analiza wartości czujników nie dostarczyła informacji o dokładnych warunkach, w których występował badany problem, ponieważ wpływ na niego ma kilka czynników, z których głównymi były temperatura zewnętrzna, rozkład masy transportowanego materiału na przenośniku, prędkość transportu i chwilowa moc silników. Możliwe jest jednak porównanie dwóch sytuacji w podobnych warunkach zewnętrznych. Takie porównanie przedstawiono na rysunku 10.12. Wyraźnie widać, że moc silnika była większa w przypadku, gdy wystąpiła awaria, niż w przypadku, gdy awaria nie wystąpiła. Niemniej jednak chwilowa moc nie przekraczała dozwolonych limitów, a sama jej analiza nie była wystarczająca do zdiagnozowania ryzyka awarii. Ponadto sam pomiar mocy miał miejsce w sytuacji, w której awaria już wystąpiła i nie był wystarczającą przesłanką pozwalającą na jej przewidzenie.

Rozpoczyna się napór taśmy na krążniki



(A)

Taśma napiera mocniej na krążniki



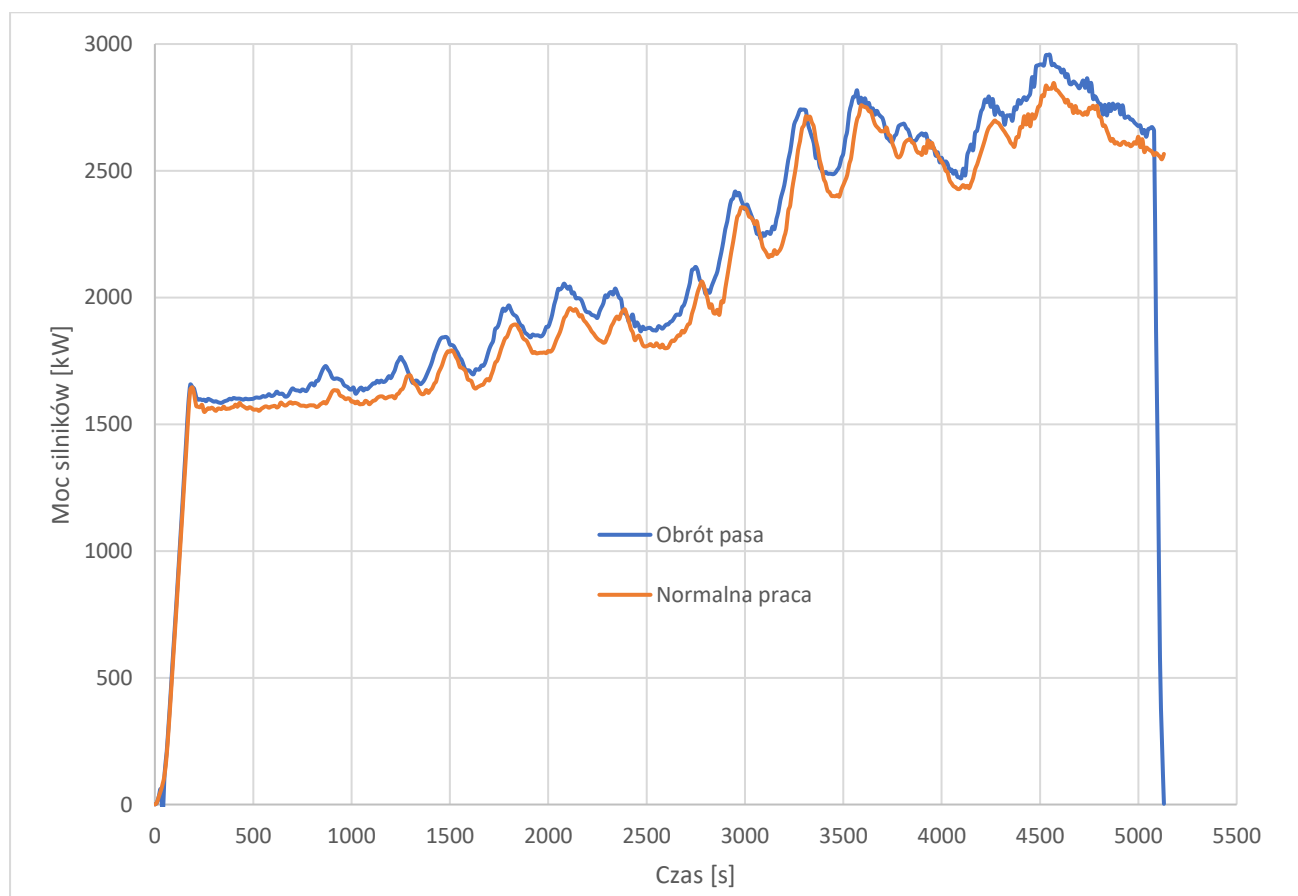
Dругi brzeg taśmy traci kontakt z

(B)



(C)

Rysunek 10.11 Obrót taśmy – (A) przed awarią, (B) w trakcie awarii, (C) po awarii.

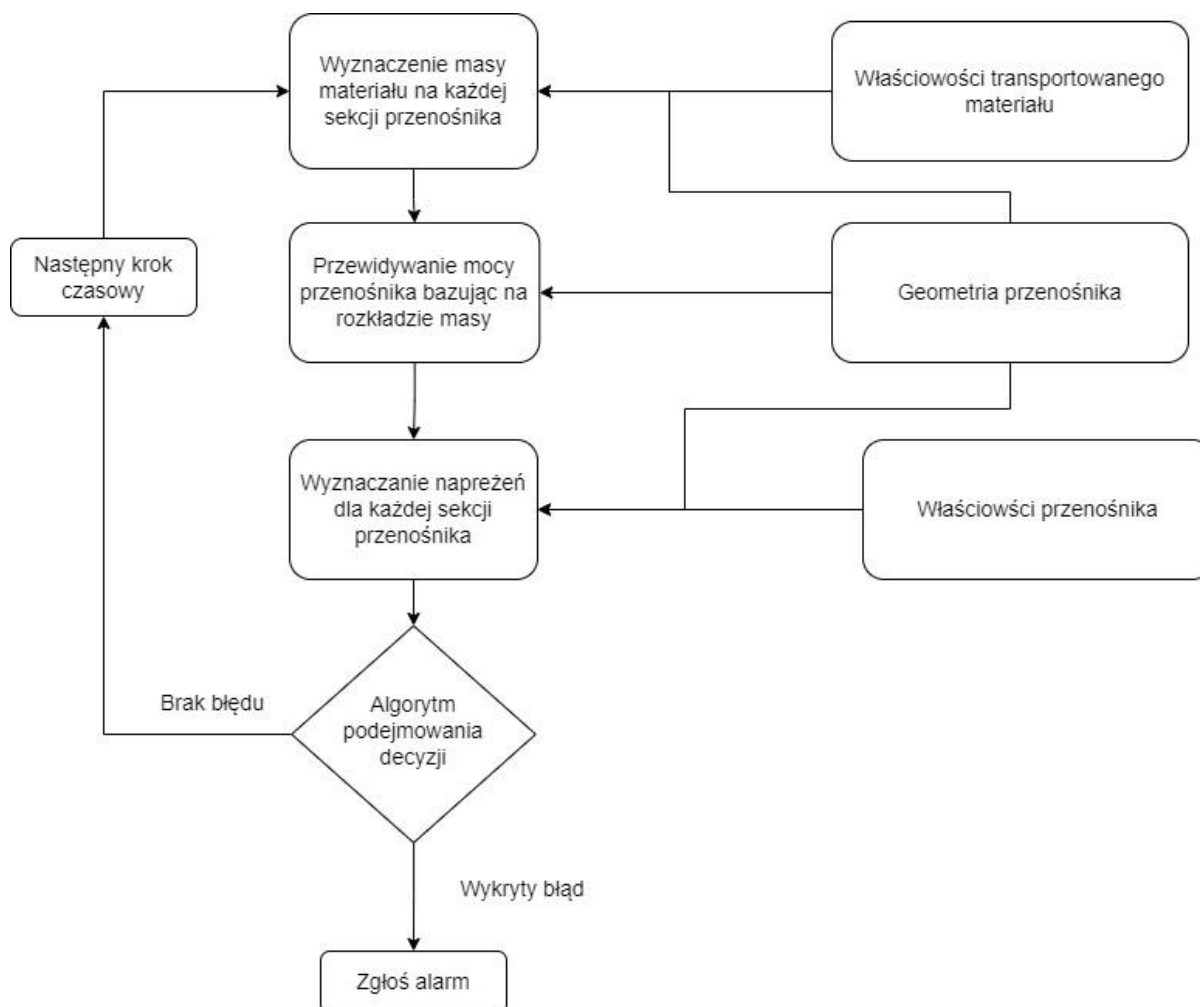


Rysunek 10.12 Porównanie mocy napędu przenośnika w przykładowych przypadkach.

10.2.2. Procedura wykrywania ryzyka obrotu taśmy

Proponowany algorytm opiera się na połączeniu algorytmów uczenia maszynowego, algorytmów analitycznych, które określają siły oddziałujące na poszczególne elementy przenośnika, oraz algorytmu podejmowania decyzji jednoczenie kategoryzującego wyniki obliczeń. Założeniem postawionym przed algorytmem jest utrzymanie ciągłej pracy przenośnika i wykrywanie niepożądanych zdarzeń, które mogą wystąpić w przyszłości, unikając w ten sposób awarii i przestojów. Głównym celem algorytmu jest określenie sił powodujących naprężenie taśmy na początku i na końcu badanego odcinka. Następnie, na podstawie różnicy naprężeń na badanym odcinku, warunków zewnętrznych i charakterystyki pracy urządzenia, umożliwia podejmowanie decyzji odnośnie do dalszych kroków postępowania. Aby określić wartości sił działających na przenośnik, konieczne jest zebranie wszystkich parametrów fizycznych przenośnika i transportowanego materiału, określenie obciążenia, sił i naprężeń, a następnie, na podstawie ustalonych wartości, podjęcie decyzji o prawdopodobieństwie awarii. Obliczenia sił i oporów przedstawiono w punkcie 6.

Ponieważ algorytm powinien działać w czasie rzeczywistym i przewidywać przyszłe zdarzenia, obliczenia muszą być wykonywane w krokach czasowych. Proponowany algorytm przedstawiono na rysunku 10.13.



Rysunek 10.13 Algorytm przewidywania obrotu taśmy.

10.2.3. Wyznaczanie masy materiału na sekcjach przenośnika

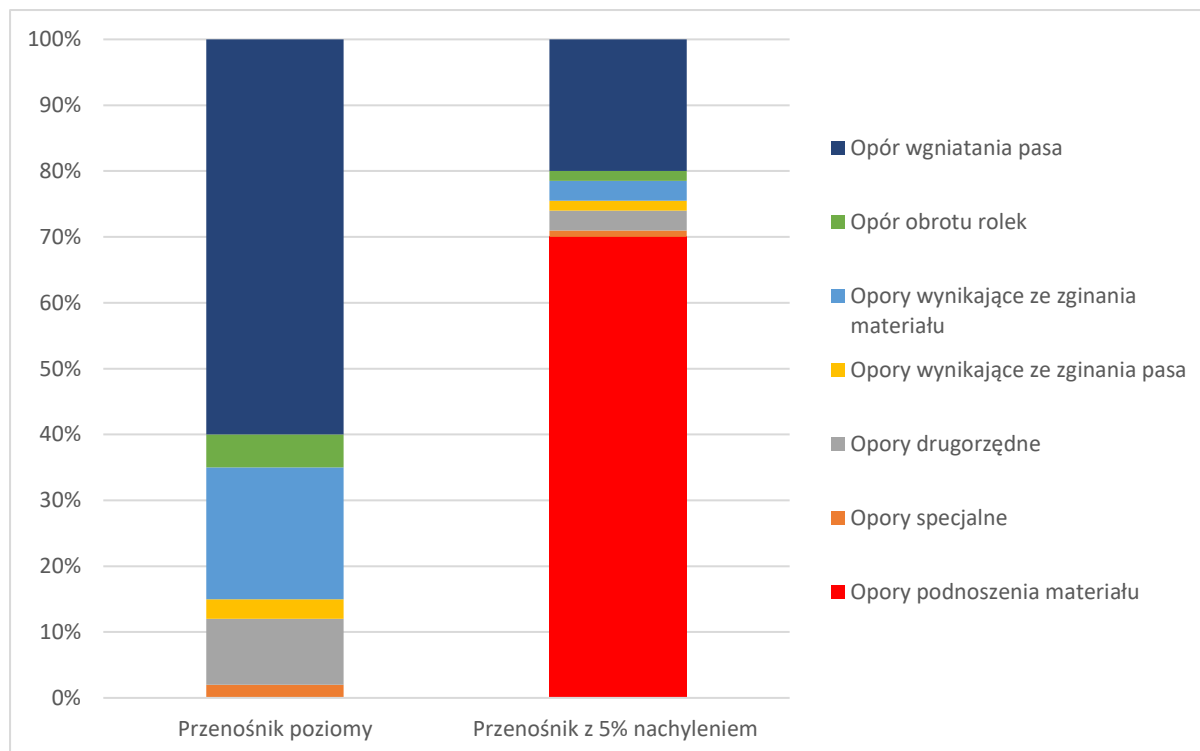
Aby wykonać kolejne kroki obliczeniowe, konieczne jest określenie masy materiału transportowanego na przenośniku. Dlatego też konieczne jest określenie masy na wszystkich odcinkach przenośnika przy użyciu równania 10.3. Początek odcinka i oznaczono jako x_1 , a jego koniec jako x_2 . Funkcja obciążenia przenośnika materiałem $f(t)$ informuje o wartości obciążenia w określonym momencie czasu. Obliczenia opierają się na założeniu stałej prędkości transportowej v .

$$M_i = \int_{x_1}^{x_2} f(t - v * x) dx \quad (10.3)$$

10.2.4. Wyznaczanie mocy silników oraz naprężeń na przenośniku

Moc silników jest jedną z kluczowych właściwości przenośnika, ponieważ jest wynikiem ona wprost z przez oporów występujących podczas pracy oraz definiuje lokalne napięcie w dowolnym punkcie wzdłuż taśmy transmisyjnej. Jako główny element przenośnika taśma łączy większość elementów mechanicznych, w tym koła pasowe i koła napinające, dodatkowo znacząco wpływa na obciążenia, którym poddawane są łożyska kół pasowych oraz krążników.

Z obliczeń oporów przenośnika zawartych w rozdziale 6 wynika, iż temperatura otoczenia i obciążenie materiału na taśmie są kluczowymi czynnikami, które mają wpływ na wymaganą do transportu materiału moc silników. Dla przykładu norma DIN 22101 [85] opisuje wpływ masy transportowanego materiału na wymaganą moc silników. W przypadku przenośników bez łuków pionowych, a więc bez zmiany wysokości wzdłuż trasy transportu, całkowita masa taśmy wraz transportowanym materiałem powinna zapewnić wystarczająco dokładne dane wejściowe, aby przewidzieć całkowitą moc napędową. Jednak w przypadku długich przenośników, których trasa zawiera łuki pionowe wraz ze znacznymi odcinkami posiadającymi zmianę rzędnej trasy, takimi jak badany przenośnik (opisany w punkcie 3), oporu materiału dla gradientu wysokości taśmy znacząco wpływa na moc silników. Stąd moc silników można przewidzieć z większą dokładnością, uwzględniając rzeczywistą geometrię przenośnika, co zostało zaprezentowane w rozdziale 10.1.3. Rysunek 10.14 ilustruje wpływ warunków trasy na wartości oporu. W przypadku przykładowej trasy [85] opór spowodowany 5% nachyleniem taśmy stanowi około 70% całkowitego oporu ruchu przenośnika.

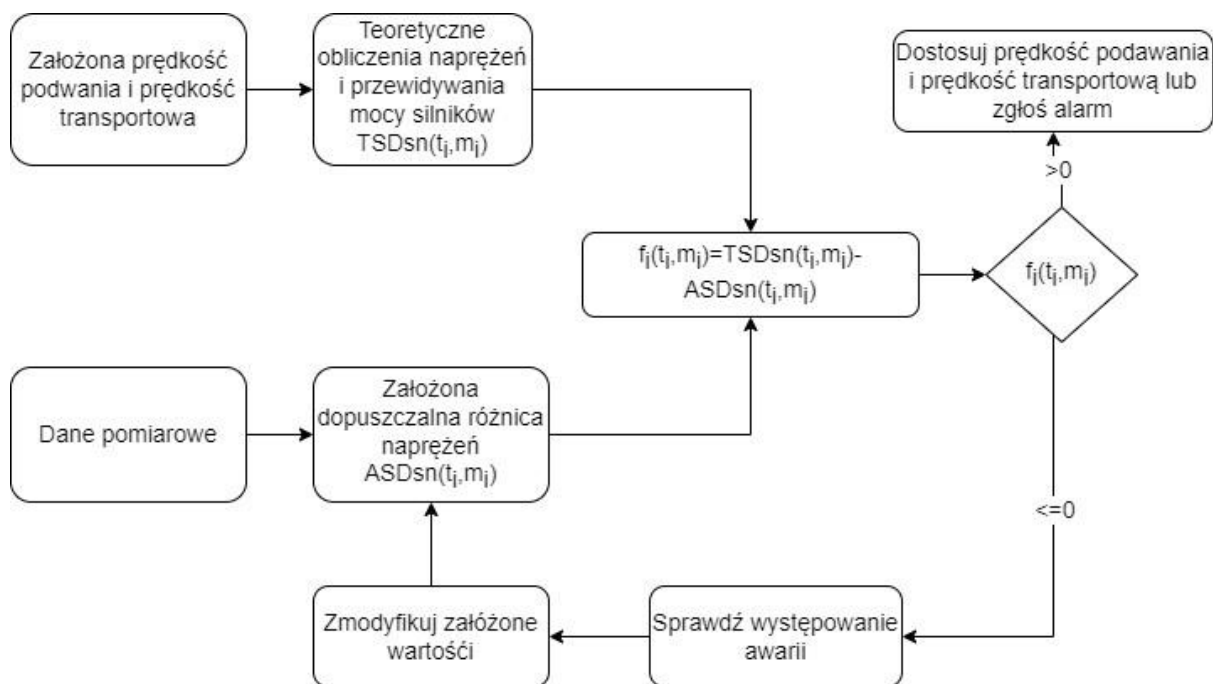


Rysunek 10.14 Porównanie oporów ruchu przenośników taśmowych dla dwóch instalacji przenośników taśmowych długich o identycznej konstrukcji, różniących się nachyleniem [85].

Na oszacowanie mocy napędowej wpływają również efekty związane z dynamiką zmian podczas pracy przenośnika. Yao i Zhang badali wpływ sprężystości taśmy na moment początkowy przenośnika [90], natomiast Lodewijks [91] dokonał przeglądu współczesnych badań nad dynamiką zachowania przenośnika. Przytoczone publikacje pokazują, że oszacowanie mocy przenośnika w warunkach rzeczywistych jest zarówno złożone, jak i obciążone dużym błędem. Oszacowanie badanej mocy przenośnika dodatkowo komplikuje ukształtowanie terenu oraz czas propagacji obciążenia na silniki przenośnika (szacowany na maksymalnie 20 s). Inaczej wygląda sytuacja przy określaniu naprężenia na poszczególnych odcinkach taśmy. Brak danych pomiarowych uniemożliwia dostarczenie danych na potrzeby uczenia maszynowego. Z tego powodu zaproponowano metodę określania naprężeń na każdym z odcinków trasy z wykorzystaniem metody określania pojedynczych oporów. Zgodnie z rozdziałem 6 opór na przenośniku składa się z następujących elementów: opór wgniatania taśmy, opór biegu jałowego, opór zginania materiału, opór zginania taśmy, opory drugorzędne (np. podczas załadunku taśmy lub czyszczenia), opory specjalne występujące w przypadku niestandardowych rozwiązań technicznych, opory gradientu wynikające z podnoszenia się i opadania materiału na przenośniku (bardzo istotne w badanym przenośniku).

10.2.5. Algorytm podejmowania decyzji

Rysunek 10.15 przedstawia proponowany algorytm podejmowania decyzji. Celem algorytmu jest diagnozowanie niepożądanych sytuacji i dostosowywanie pracy przenośnika taśmowego lub zgłaszanie awarii przed jej faktycznym wystąpieniem. Algorytm jest inicjalizowany przez określenie obliczeniowych wartości naprężeń taśmy w danym kroku czasowym $TSD_{sn}(t_i, m_i)$ zgodnie z punktem 6. Jednocześnie przyjmuje się wartości naprężeń granicznych na każdym odcinku $ASD_{sn}(t_i, m_i)$ w zależności od parametrów danego odcinka. Algorytm może korygować przyjęte parametry na podstawie rzeczywistych pomiarów i zdarzeń, czyli awarii, zachodzących w trakcie pracy urządzenia. Porównanie wartości granicznych z wartościami teoretycznymi pozwala podjąć decyzję o modyfikacji prędkości transportu lub zmniejszeniu obciążenia przenośnika, a w efekcie zapobiec awarii.

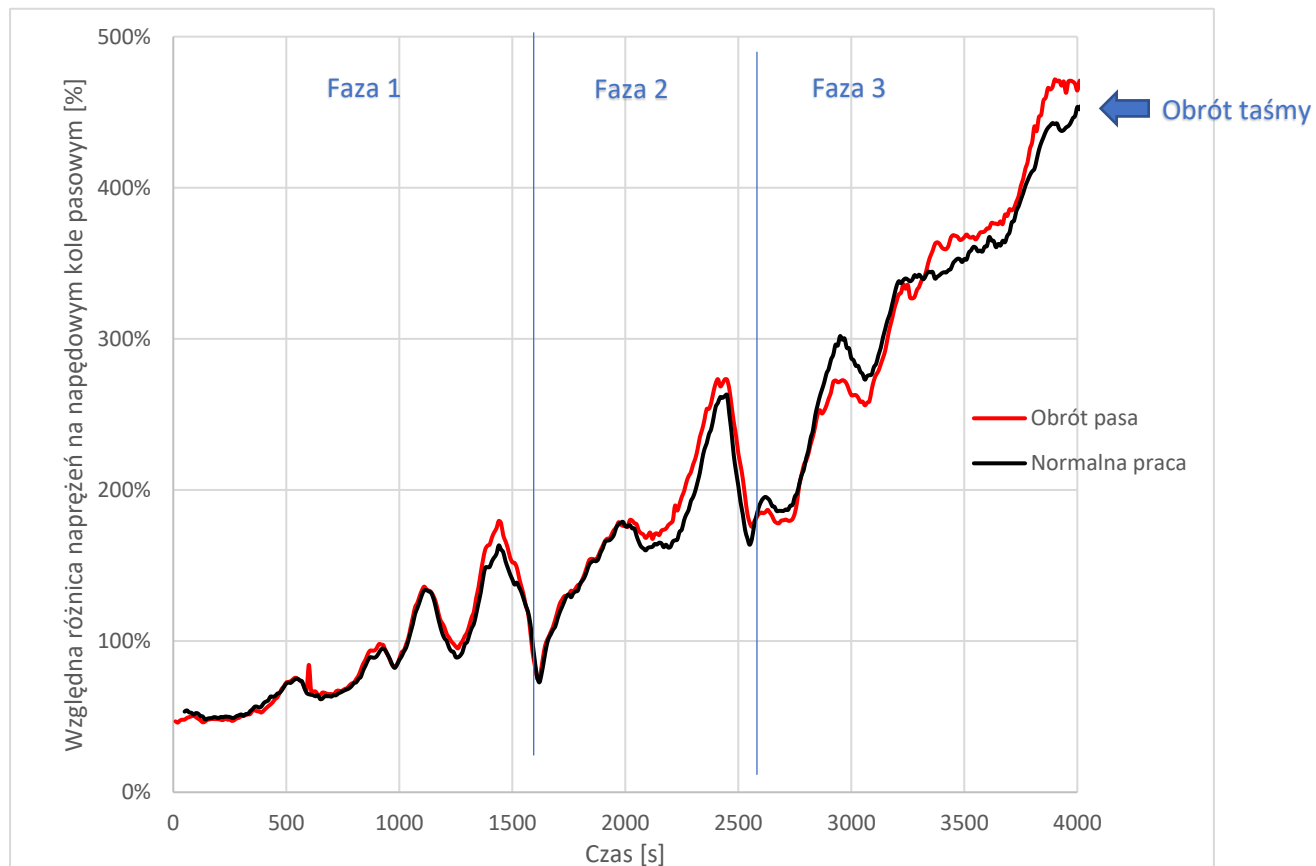


Rysunek 10.15 Wbudowany algorytm podejmowania decyzji.

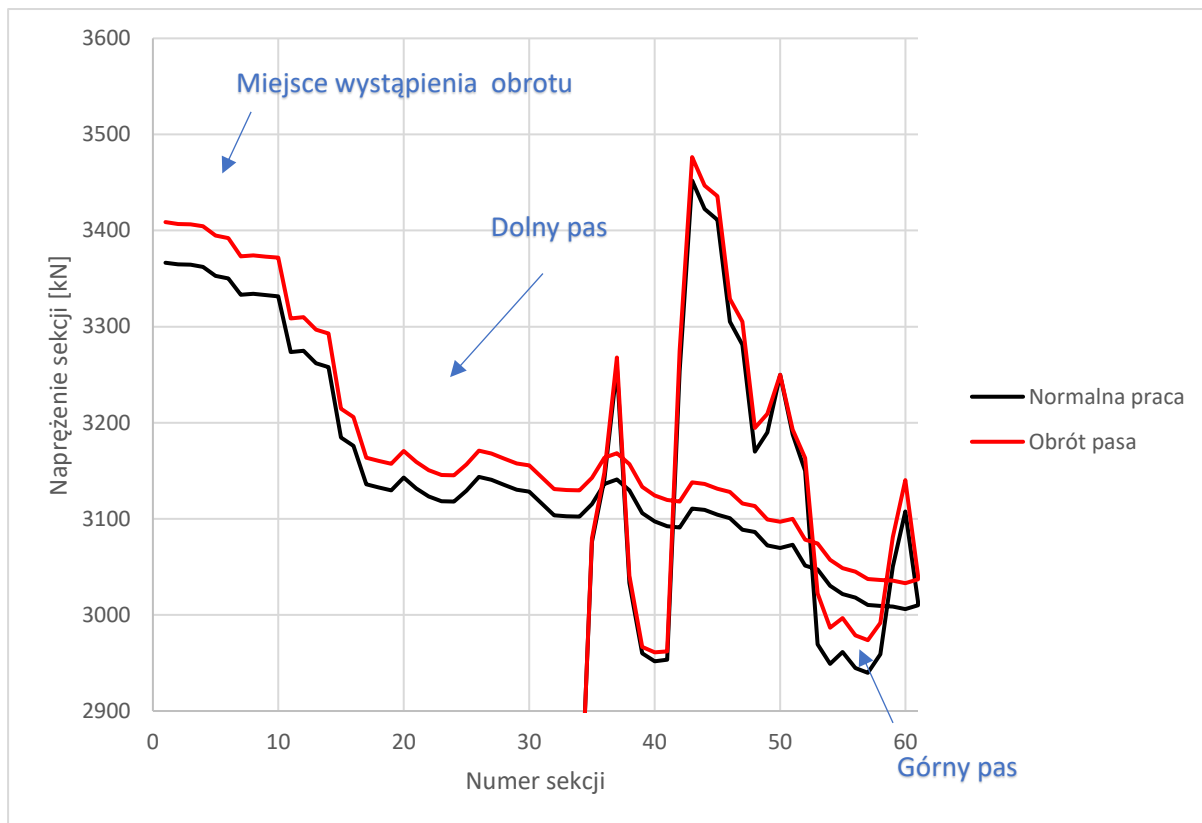
10.2.6. Opis przeprowadzonych symulacji

Symulacje przeprowadzono w celu weryfikacji dokładności i skuteczności proponowanej metody wykrywania ryzyka awarii polegającej na obrocie taśmy. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem danych pobranych z badanego przenośnika. Schemat załadunku przenośnika w przypadku wystąpienia awarii wynosił 650 t/h przez pierwsze 24 min (faza 1). Przez kolejne 16 min prędkość załadunku wzrosła do 1750 t/h (faza 2), a po tym okresie do 2500 t/h (faza 3). Awaria wystąpiła, gdy na przenośniku znajdowało się 1660 ton materiału. W przypadku normalnej pracy bez awarii prędkość załadunku wynosiła odpowiednio 600 t/h, 1700 t/h i 2400 t/h. Maksymalna ilość materiału na przenośniku w tym przypadku wyniosła 1730 ton. Prędkość transportu w obu przypadkach wyniosła 5 m/s. Obliczenia przeprowadzono dla każdej z 61 sekcji oddzielnie. Biorąc pod uwagę taśma górny i dolny, uzyskano 122 wartości naprężeń dla każdej sekcji i dla każdego cyklu obliczeń. Na rysunku 10.16 przedstawiono wyniki symulacji naprężeń na taśmie transportowej tuż przed awarią i w przypadku normalnej pracy bez awarii. Obliczenia wykazały, że na występowanie zbyt dużej różnicy naprężeń miała wpływ zarówno zbyt duża moc silnika, jak i rozkład masy na przenośniku. A dokładnie na odcinkach 50 do 55 na górnym pasie występuje zbyt mały spadek naprężeń. Efekt ten rozprzestrzenia się następnie na całej długości przenośnika i w połączeniu ze zwiększoną mocą silników powoduje zbyt duże naprężenia w odcinku 1 na dolnym odcinku taśmy, co skutkuje jego wywróceniem. Na rysunku 10.17 przedstawiono zależność czasową wzrostu naprężeń na pierwszym odcinku przenośnika. Po upływie około 1500 s od momentu rozpoczęcia podawania materiału przebiegi naprężeń rozchodzą się dla

normalnej pracy i w przypadku awarii. Jak wykazały badania, efekt ten jest spowodowany zbyt dużą masą na ostatnich odcinkach przenośnika (odcinki 50 do 55). Wyniki symulacji ujawniły, że problem z odwracaniem się taśmy na początku dolnej taśmy jest spowodowany nadmierną ilością transportowanego materiału na drugim końcu testowanego przenośnika.



Rysunek 10.16 Porównanie wzrostu napięcia na sekcji w sytuacji wystąpienia awarii.



Rysunek 10.17 Napięcia sekcji na górnym i dolnym pasie.

Analizy ujawniają, iż problem obrotu taśmy może wystąpić w dowolnym miejscu na taśmie przenośnika w sytuacjach, w których różnica w napięciu taśmy jest znacząca. Sytuacja ta jest nierozdzielnie związana z ilością transportowanego materiału i prędkością taśmy. Innym ważnym czynnikiem wpływającym na ryzyko przewrócenia taśmy i wystąpienia niepożądanego różnicy w napięciu jest opóźnienie reakcji systemu. W przypadku badanego przenośnika reakcja mierzona w najbardziej oddalonych punktach wynosiła od 10 s do 20 s, w zależności od obciążenia przenośnika. Symulacje i pomiary wykazały, że zmniejszenie prędkości lub ilości transportowanego materiału znacznie zmniejsza problem przewrócenia taśmy. Powoduje to jednak ograniczenia w wydajności urządzenia.

Podsumowując w niniejszym rozdziale przedstawiono oryginalną metodę wykrywania ryzyka przewrócenia się taśmy na podstawie danych pomiarowych, szacunków teoretycznych z wykorzystaniem uczenia maszynowego, obliczeń analitycznych obciążeń przenośnika oraz zintegrowanego algorytmu decyzyjnego. Przeprowadzono symulacje w celu weryfikacji proponowanej metody. Analizy potwierdziły pierwotną hipotezę, że problem przewrócenia się taśmy jest spowodowany zbyt dużą różnicą naciągu taśmy przenośnika. Im większe przenośniki, tym bardziej skomplikowana ich geometria i tym

większa potrzeba przewidywania ryzyka przewrócenia się taśmy. Wyniki porównano z rzeczywistymi danymi pomiarowymi. Analiza symulacji wykazała, że proponowany algorytm może zwiększyć niezawodność i wspomagać utrzymanie przenośników taśmowych poprzez przewidywanie ryzyka przewrócenia się taśmy, a w konsekwencji długotrwałej naprawy.

10.3. Wyznaczenie ryzyka zbyt dużego przesunięcia taśmy

Wyznaczanie ryzyka zbyt dużego przesunięcia taśmy jest częścią systemu monitorowania przenośnika, pozwalającą przewidywać ryzyko powstania w/w awarii.

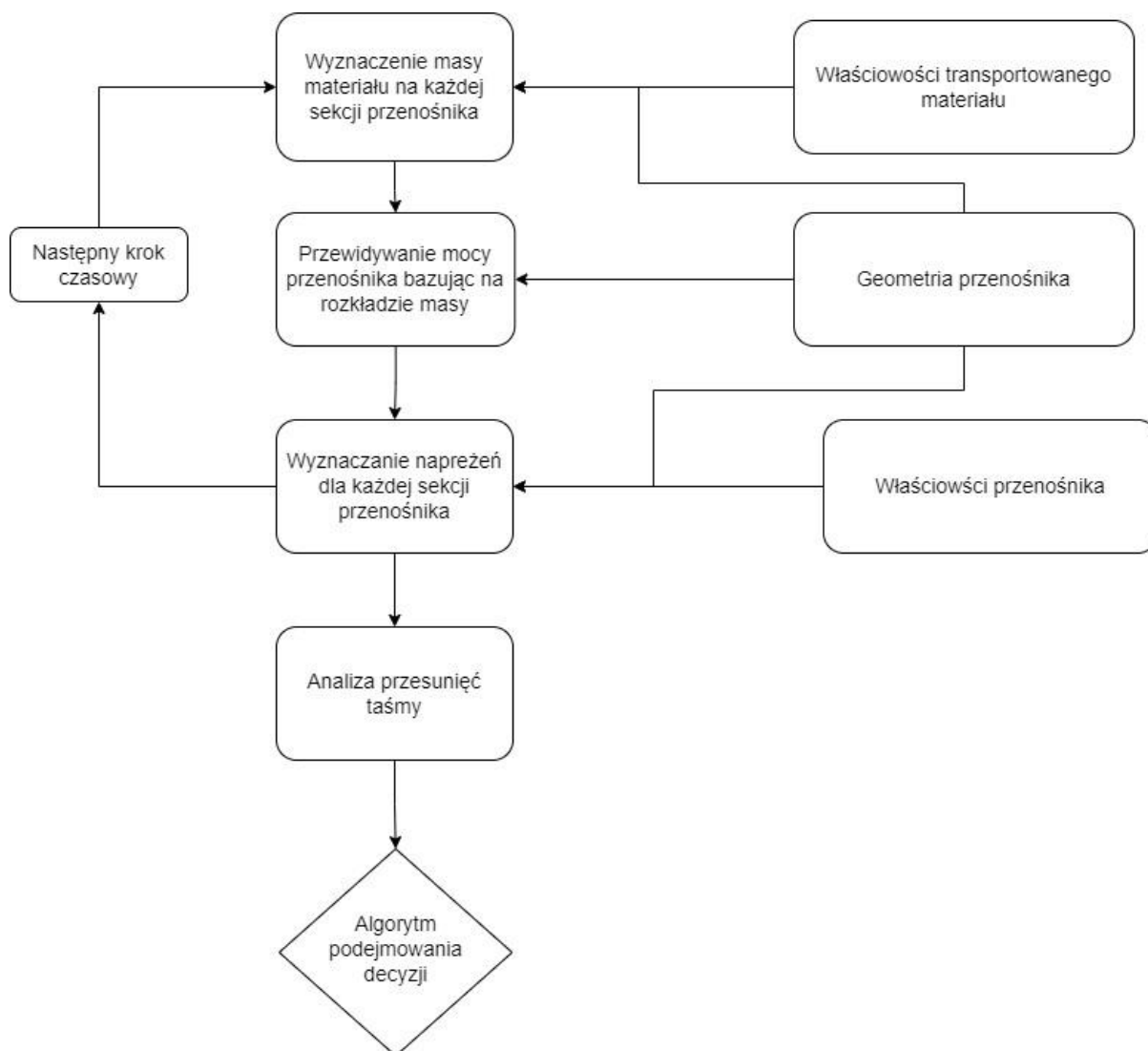
Tak jak w przypadku badania ryzyka obrotu pasa, ze względu na fakt, iż badane przenośniki są obiektami dużymi istnieje z realne ryzyko niepożądanego zachowanie się taśmy wzdłuż przenośnika. Ryzyko to jest szczególnie związane z łukami na występującymi na trasie instalacji. Obecnie są dostępne metody pozwalające na wykryć zbyt duże przesunięcie pasa za pomocą czujników zamontowanych w krytycznych miejscach instalacji. Istnieje również możliwość zamontowania specjalnych krążników mających za zadanie ograniczenie możliwość przemieszczenia się taśmy.

Proponowane metoda korzysta z części wcześniej opisanych badań. Wykorzystuje metody przewidywania mocy silników opisane w punkcie 10.1. Wykorzystuje również metodę określania dystrybucji masy na przenośniku opisaną w punkcie 10.2.3 oraz metody określania mocy, naprężeń i oporów opisane w punkcie 6 i 10.2.4.

10.3.1. Procedura wykrywania ryzyka zbyt dużego przesunięcia taśmy

Proponowany algorytm, analogicznie jak w przypadku propozycji z punktu 10.2.2, opiera się na połączeniu algorytmów uczenia maszynowego, algorytmów analitycznych, które określają siły oddziałujące na poszczególne elementy przenośnika, oraz algorytmu podejmowania. Postawione przed nim zadanie również dotyczy zapewnienia ciągłości działania przenośnika i zapobieganie wystąpienia awarii skutkujących przestojami pracy przenośnika. Z tytułu, iż tak samo jak w poprzednim przypadku głównym zadaniem jest określenie sił oddziaływujących na przenośniku wraz z siłami działającymi dośrodkowo i odśrodkowo na danym statywie krążników. Obliczenia sił i oporów przedstawiono w punkcie 6. Tak w jak w poprzednim przypadku do zapewnienia działania algorytmu konieczne jest dostarczenie danych zarówno pomiarowych jak i założenie w perspektywie krótkoterminowej parametrów pracy, a następnie na podstawie wyznaczonych wartości podjęcie decyzji odnośnie dalszych działań. Z powodu, iż procedura w znacznej części pokrywa się z procedurą zaproponowaną w punkcie 10.2 algorytmy te mogą pracować wspólnie.

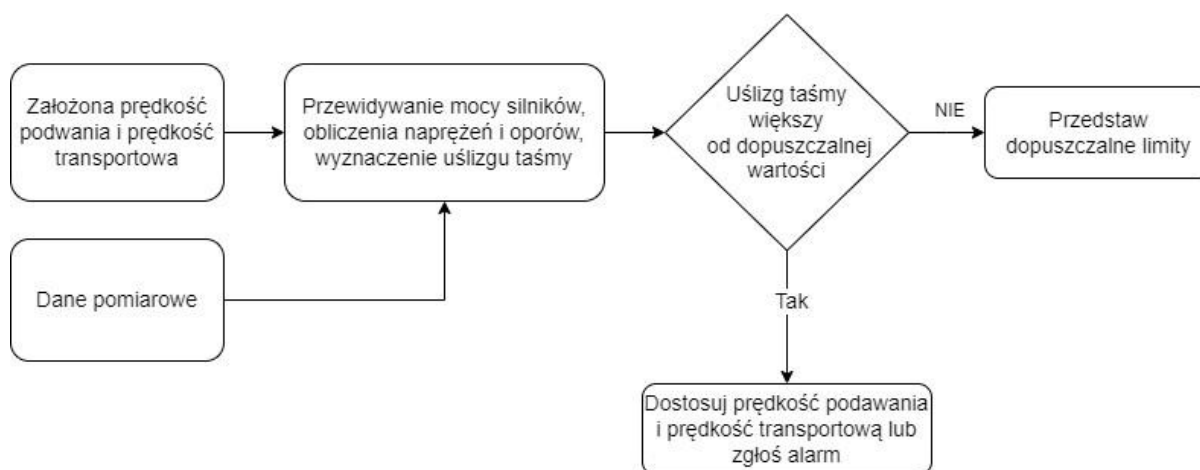
Ponieważ algorytm powinien działać w czasie rzeczywistym, tak jak w poprzednim przypadku, w celu oszacowania ryzyka przyszłych zdarzeń, analizy powinny odzwierciedlać również przyszłe okresy czasowe. Proponowany algorytm przedstawiono na rysunku 10.18. Szczegółowa analiza dla konkretnego kroku czasowego została zaprezentowana w punkcie 6 na rysunku 6.3.



Rysunek 10.18 Algorytm przewidywania przesunięcia taśmy.

10.3.2. Algorytm podejmowania decyzji

Celem działania algorytmu podejmowania decyzji jest danie możliwości reakcji na ryzyko wystąpienia zbyt dużego przesunięcia taśmy. Aby algorytm mógł działać konieczne jest określenie maksymalnych możliwych przesunięć. Mogą one wynikać wprost z konstrukcji statywu krążników w tym zastosowaniu przedłużonych krążników, czwartej krążniki lub też krążniki strażnika blokującego przesunięcie taśmy. W rezultacie działania algorytmu operator przenośnika otrzymuje informację o ryzyku zbyt dużego przesunięcia wraz z rekomendacjami odnośnie możliwych działań zaradczych. Procedurę przedstawione na rysunku 10.19.



Rysunek 10.19 Algorytm podejmowania decyzji odnośnie do przesunięcia taśmy.

10.3.3. Wyniki symulacji

Celem przeprowadzonych symulacji sprawdzenie wpływu zmiany parametrów operacyjnych na przesunięcie taśmy. W badaniach użyto przenośnik o łącznej długości 723m. Badania zostały przeprowadzone na dwóch łukach o takich samych parametrach zarówno na pasie górnym jak i dolnym. Łącznie w badaniach wyznaczano przesunięcie na czterech odcinkach. W tabeli 10.2 przedstawiono badany przenośnik. Badania przeprowadzono z użyciem stałej temperatury zewnętrznej 10 °C. Zmianie ulegała prędkość transportowa oraz szybkość podawania materiału. W tabeli 10.3 zaprezentowano wyniki dla symulacji z prędkością transportową 3m/s i prędkością podawania 1250t/h. Przesunięcie taśmy w przypadku przenośnika w pełni obciążonego wahał się pomiędzy 87,58mm a 83,28mm dla warunków stacjonarnych oraz pomiędzy 10,53mm a 7,41 dla pracy bez obciążenia. W warunkach niestacjonarnych, czyli uruchamiania bądź hamowania, przesunięcia te były odpowiednio większe i wynosiły pomiędzy 91,5mm a 89,63 oraz w okolicy 17mm dla przenośnika pustego. W przypadku sekcji umieszczonych na dolnej taśmie w każdym przypadku wartości podawane są bez obciążenia jednak w każdym przypadku, są one różne. Zachowanie takie wynik z faktu różnicy naprężeń taśmy wynikającej z oddziaływań pozostałych odcinków przenośnika. W tabeli 10.4 zawarto rezultaty dla wzrostu prędkości transportowej do 5m/s. Dla każdego z przypadków można zaobserwować wzrost przesunięcia pasa. W tabeli 10.5 zawarto wyniki dla prędkości transportowej 5m/s i wzrostu prędkości podawania do 2000t/h. Dla tego wariantu symulacji przesunięcie pasa zmniejszył się ze względu na działanie sił dośrodkowych wynikających ze wzrostu ilości transportowanego materiału. Bardzo interesujące wyniki zaprezentowane są w tabeli 10.6 dotyczą one przenośnika tylko częściowo wypełnionego materiałem. W tym przypadku różnica pomiędzy poszczególnymi przypadkami przesunięcia taśmy wynosi ponad 100mm i może mieć krytyczne znaczenie dla parametrów operacyjnych przenośnika.

Numer sekcji	Lokalizacja	Δh	l	Długość całkowita	Promień krzywej wklęsłej	Promień krzywej wypukłej	Łuk poziomy
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	Górny pas	4,11	132,29	132,23	0	0	2000
2	Górny pas	0,24	15,65	147,88	0	500	0
3	Górny pas	0	23,91	171,79	0	0	0
4	Górny pas	0	315,25	487,03	0	0	2000
5	Górny pas	0	19,47	506,5	0	0	0
6	Górny pas	2,43	85,37	591,84	1500	0	0
7	Górny pas	7,28	85,37	676,9	1500	0	0
8	Górny pas	5,29	46,57	723,16	0	0	0
9	Napęd			723,16			
10	Naciąg wstępny			723,16			
11	Dolny pas	-5,29	46,57	676,9	0	0	0
12	Dolny pas	-7,28	85,37	591,84	1500	0	0
13	Dolny pas	-2,43	85,37	506,5	1500	0	0
14	Dolny pas	0	19,47	487,03	0	0	0
15	Dolny pas	0	315,25	171,79	0	0	2000
16	Dolny pas	0	23,91	147,88	0	0	0
17	Dolny pas	-0,24	15,65	132,23	0	500	0
18	Dolny pas	-4,11	132,29	0	0	0	2000
19	Koło pasowe			0			

Tabela 10.2 Geometria badanego taśmociągu.

Numer sekcji	Lokalizacja	Początek sekcji	Maksymalne przesunięcie taśmy dla przenośnika w pełni obciążonego		Maksymalne przesunięcie taśmy dla przenośnika pustego	
			Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne	Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne
		[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	Górny pas	132,23	89,62	87,58	17,43	10,53
4	Górny pas	487,03	91,5	83,28	17,26	7,41
15	Dolny pas	171,79	36,26	24,39	34,92	24,39
18	Dolny pas	0	36,84	17,93	35,4	17,93

Tabela 10.3 Rezultaty dla prędkości transportowej 3m/s i prędkości podawania 1250t/h.

Numer sekcji	Lokalizacja	Początek sekcji	Maksymalne przesunięcie taśmy dla przenośnika w pełni obciążonego		Maksymalne przesunięcie taśmy dla przenośnika pustego	
			Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne	Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne
		[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	Górny pas	132,23	105,73	102,9	21,06	15,24
4	Górny pas	487,03	107,07	99,04	21,3	12,29
15	Dolny pas	171,79	50,45	37,78	46,52	37,78
18	Dolny pas	0	51,15	32,22	46,94	32,22

Tabela 10.4 Rezultaty dla prędkości transportowej 5m/s i prędkości podawania 1250t/h.

Numer sekcji	Lokalizacja	Początek sekcji	Maksymalne przesunięcie taśmy dla przenośnika w pełni obciążonego		Maksymalne przesunięcie taśmy dla przenośnika pustego	
			Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne	Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne
		[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	Górny pas	132,23	90,57	88,34	12,7	6,95
4	Górny pas	487,03	92,11	84,02	12,91	4,02
15	Dolny pas	171,79	25,74	11,85	20,56	11,85
18	Dolny pas	0	26,72	6,42	20,96	6,42

Tabela 10.5 Rezultaty dla prędkości transportowej 5m/s i prędkości podawania 2000t/h.

Numer sekcji	Lokalizacja	Początek sekcji	Maksymalne przesunięcie taśmy dla sekcji z obciążeniem		Maksymalne przesunięcie taśmy dla sekcji bez obciążenia	
			Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne	Warunki niestacjonarne	Warunki stacjonarne
		[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	Górny pas	132,23	90,49	88,4	-	-
4	Górny pas	487,03	89,75	84,10	-29,07	-9,99
15	Dolny pas	171,79	25,10	12,03	25,10	12,03
18	Dolny pas	0	25,89	6,96	25,89	6,96

Tabela 10.6 Rezultaty dla prędkości transportowej 5m/s i wypełnionymi materiałem sekcjami nr 1,2 i 3.

Z badań wynika, iż możliwe jest stworzenie systemu przewidującego przesunięcie taśmy. Z badań wynika również, że duże znacznie dla wartości przesunięcia, mają parametry operacyjne przenośnika w tym w szczególności rozkład masy na przenośniku. W niektórych przypadkach informacja o zwiększonym ryzyku nadmiarowego przesunięcia może zapobiec awarii przenośnika i w konsekwencji przerwie w pracy zakładu.

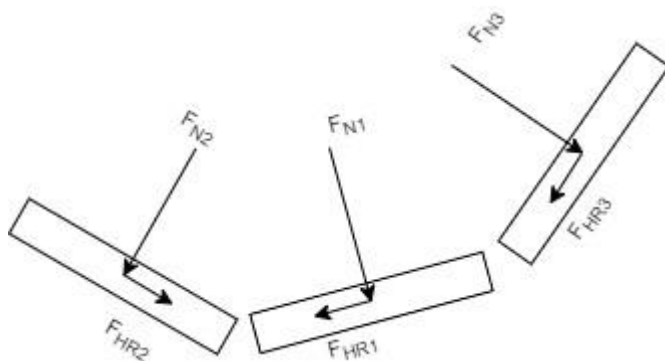
10.4. Wyznaczanie czasu życia krążników i identyfikacja krążników wymagających wymiany

Głównym celem procedury jest zapewnienie możliwie jak najdłuższej bezawaryjnej pracy krążników w przenośnikach taśmowych. Proponowany algorytm stanowi innowacyjne rozwinięcie, wraz z uzupełnieniem braków, propozycji procedury zaproponowanej przez Liu [59]. Temat został szczegółowo opisany przez autora w artykule naukowym [92].

Proponowana metoda wymaga oszacowania teoretycznego czasu życia łożysk znajdujących się we wnętrzu krążników. Następnie oszacowanie teoretycznej ilości awarii w badanych interwałach czasowych. W kolejnym kroku procedury proponuje się zebrane wyniki teoretyczne porównać z wynikami pomiarów krążników w celu wytypowania elementów do wymiany. Całość procedury dopełnia algorytm podejmowania decyzji.

10.4.1. Wyznaczenie sił działających na łożyska

W nowoczesnych instalacjach przenośników taśmowych występują częste łuki oraz wzniesienia. Z powodu zmian geometrii trasy następują przemieszczenia taśmy oraz materiału transportowanego względem krążników przenośnika. Zmiana geometrii wymusza też stosowanie różnych statywów dla krążników oraz ich rotacji względem poziomu trasy. Skomplikowana geometria wiąże się z tego powodu z różnymi siłami działającymi na krążniki w różnych odcinkach trasy. Wyrażenie przedstawiające siły normalne F_N działające na krążki zostało przedstawione we wzorze 6.22 opisanym w rozdziale 6.



Rysunek 10.20 Rozkład najważniejszych sił oddziaływujących na krążniki umieszczone na statywie.

Ponieważ aby prawidłowo wyznaczyć czas pracy danej krążniki niezbędne jest też wyznaczenie sił działających równoległe do osi. W tym celu można posłużyć się wzorem 10.20 gdzie siłę równoległą do osi krążniki oznaczono F_{HR} .

$$F_{HR,k} = \text{sign}(\varphi_k) * F_{N,k} * \mu_k * \cos \varphi_k \quad (10.4)$$

φ – efektywny kąt nachylenia

μ - współczynnik tarcia pomiędzy krążnikiem a pasem

Aby prawidłowo wyznaczyć siły oddziaływujące na krążniki przenośnika należy również określić położenie taśmy względem wszystkich krążników badanego przenośnika. Do wyznaczenia położenia taśmy należy w sposób iteracyjny zrównoważyć następujące siły: siła działająca prostopadłe do kierunku ruchu taśmy (siła tarcia), pozioma składowa siły od przenoszonego materiału, pozioma składowa siły wynikająca z ciężaru paska, pozioma składowa siły od siły odśrodkowej ciężaru taśmy na łukach poziomych, składowa pozioma siły od siły odśrodkowej ciężaru materiału na krzywiznach poziomych, pozioma składowa siły wynikająca z napięcia paska na łukach pionowych. Zmienną niezależną w powyższych równaniach jest przemieszczenie taśmy względem krążników. Dokładną procedurę wyznaczania sił oraz położenia taśmy przedstawiono na rysunku 6.3 w rozdziale 6.

Ze względu na nierównomierne rozłożenie nacisku na krążniki przenośnika, które wynika z nachylenia i rozłożenia materiału na przenośniku, aby oszacować rozłożenie sił konieczne jest wyznaczenie również sił oddziaływujących na poszczególne łożyska. Specyfika krążników przenośnika, które umieszczone są pod różnymi kątami powoduje, że oprócz sił działających prostopadłe F_r do osi łożyska należy także uwzględnić również siły działające równoległe F_a . Wyrażenie pozwalające wyznaczyć równoważne dynamiczne obciążenie łożyska P przyjmuje postać wzoru 10.5 gdzie X_1 to współczynnik obciążenia promieniowego a X_2 to współczynnik obciążenia osiowego.

$$P = X_1 F_r + X_2 F_a \quad (10.5)$$

Dokładniejsze obliczenia w z rozdzieleniem na poszczególne łożyska można przeprowadzić za pomocą następujących wzorów. W pierwszej kolejności należy wyznaczyć efektywny rozkład sił od taśmy za pomocą wzoru:

$$A_H = \frac{B-l_M}{4} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{100}\right) + \frac{s_B}{2} \quad (10.6)$$

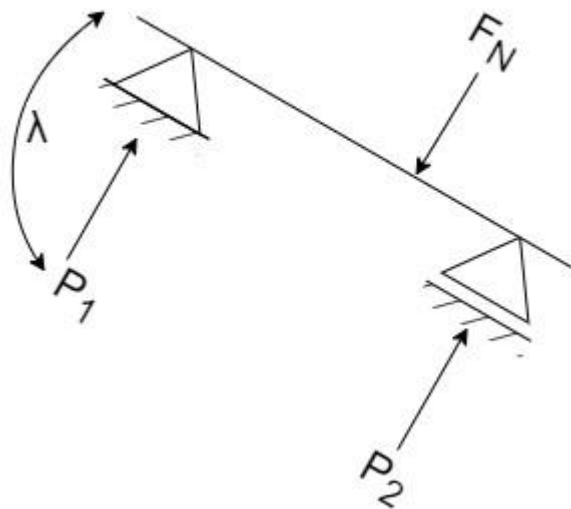
Gdzie:

F_{NB} - składowa siły normalnej wynikająca od masy i elastyczności taśmy

s_B - długość kontaktu krążniki z pasem

λ - kąt nachylenia danej krążniki

l_M - długość krążniki środkowej



Rysunek 10.21 Rozkład sił działających na łożyska w ramach danej krążniki.

A następnie składową sił od masy taśmy odpowiednio dla każdego łożyska osobno:

$$P_{1B} = F_{NB1} \cdot \frac{A_H - C}{L - 2 \cdot C} \quad (10.7)$$

$$P_{2B} = F_{NB} \cdot \frac{L - A_H - C}{L - 2 \cdot C} \quad (10.8)$$

Gdzie:

C – odległość montażu łożyska od brzegu krążniki

L – długość krążniki

W dalszej kolejności należy wyznaczyć efektywny rozkład sił od masy transportowanego materiału za pomocą wzoru:

$$D_H = \frac{b_{RSF} + \xi \cdot s_B}{3} \quad (10.9)$$

Gdzie:

ξ – Stosunek przesunięcia materiału do przesunięcia taśmy na tęgach poziomych

b_{RSF} – długość kontaktu materiału z pasem na daną krążnikiem

A następnie składową siłę od masy materiału odpowiednio dla każdego łożyska osobno:

$$P_{1G} = F_{NG} \cdot \frac{D_H - C}{L - 2 \cdot C} \quad (10.10)$$

$$P_{2G} = F_{NG} \cdot \frac{L - D_H - C}{L - 2 \cdot C} \quad (10.11)$$

Gdzie:

F_{NG} - składowa siła normalnej wynikająca od masy transportowanego materiału

Po zsumowaniu wartości odpowiednich składowych otrzymujemy wartości sił oddziaływujące na każde z łożysk osobno:

$$P_1 = P_{1B} + P_{1G} \quad (10.12)$$

$$P_2 = P_{2B} + P_{2G} \quad (10.13)$$

10.4.2. Wyznaczania czasu życia krążników

Czas życia krążników jest ściśle skorelowany z czasem życia łożysk, ponieważ łożyska są jedynym elementem ruchomym. Czas życia łożysk zgodnie z ISO 281 [93] określony jest za pomocą wzoru (10.14), gdzie L_{10} oznacza trwałość rozumianą jako ilość obrotów dla której przynajmniej 90% łożysk w danej grupie będzie sprawna, C to nominalna nośność dynamiczna będącą wartością katalogową danego łożyska, P równoważne obciążenie dynamiczne wyznaczone zgodnie ze wzorem (10.5), p wartość zależna od typu łożyska w przypadku łożysk kulkowych wynosi 3.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (10.14)$$

Ponieważ wartości wynikające ze wzoru (10.15) różnią się w zależności od producenta i pewności jaka ma być osiągnięta powyższy wzór jest uzupełniony o modyfikatory pozwalające uwzględnić: poziom pewności (np. 90%, 95% czy 99%) oraz zależność warunków pracy. Skorygowane wyrażenie przyjmuje postać wzoru 10.15, gdzie a_1 oznacza współczynnik związany z poziomem pewności a a_2 oznacza współczynnik związany z warunkami w jakich pracuje dane łożysko.

$$L_{nm} = a_1 a_2 \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (10.15)$$

Ponieważ łożyska w przypadku przenośników taśmowych pracują z różnym obciążeniem i w zmiennych warunkach zewnętrznych konieczne jest wyznaczenie wartości

uśrednionej współczynnika L_{10} zgodnie ze wzorem (10.16), gdzie L_{10n} oznacza wartość współczynnika w danych warunkach pracy a U_n udział danych warunków w ogólnym czasie pracy łożyska.

$$L_{10m} = \sum_n^1 \left(\frac{1}{\frac{U_n}{L_{10n}}} \right) \quad (10.16)$$

Rozkład prawdopodobieństwa awarii

W pracy do modelowania ryzyka awarii zaproponowano rozkład Weibull. Rozkład ten jest ciągłym rozkładem prawdopodobieństwa używanym do modelowania czasu pracy i ryzyka awarii [wei1] [wei2] [wei3] [wei4].

Na podstawie badań [g1] zostało zaproponowane, iż czasowy rozkład awarii charakteryzuje się dystrybucją $F(x)$ wynikającą z rozkładu Weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (10.17)$$

Współczynnik β jest parametrem odpowiedzialnym za kształt i w przypadku łożysk kulkowych określony jest wartością 10/9. Współczynnik α jest natomiast parametrem skali i jest on ściśle skorelowany z parametrami a_1 i a_2 . Parametr x natomiast oznacza stosunek rzeczywistych godzin pracy do paramateru L_{10} . W pracach [x1] oraz [x2] jako funkcję dystrybucji zaproponowano następujące współczynniki

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{7.58}\right)^{10/9}} \quad (10.18)$$

Dopasowywanie modelu

Ponieważ wstępne przyjęcie parametrów β i α może powodować rozbieżności pomiędzy rzeczywistą liczbą awarii a przewidywaną konieczne jest wyznaczenie procedury dopasowującej model do rzeczywistych pomiarów i obserwacji.

Dystrybucję Weibull za pomocą przekształceń matematycznych można doprowadzić do postaci, w której szukane współczynniki można oszacować za pomocą regresji liniowej. Przekształcenie dystrybucji przyjmuje postać wzoru (10.19).

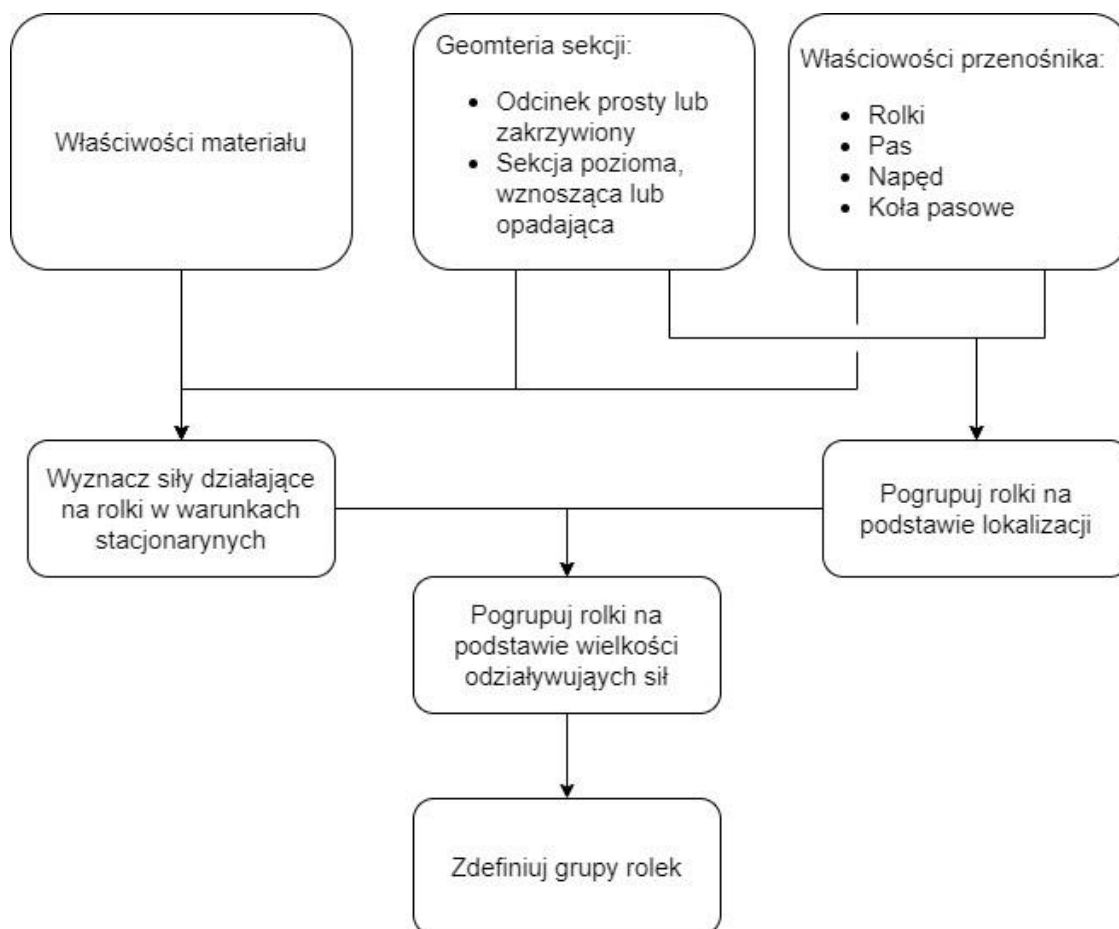
$$y = \beta x' + a \quad (10.19)$$

Gdzie $y = \ln(-\ln(1 - F(x)))$, $x' = \ln(x)$ natomiast $a = -\beta \ln(\alpha)$

Tak więc aby dopasować model konieczne jest zebranie odpowiedniej puli wymienionych krążników, które uprzednio uległy awarii wraz z informacjami o rzeczywistie przepracowanych godzinach.

Procedura wyznaczenie grup

Jak wynika z rozważań przedstawionych w punkcie 3.1. na krążniki przenośnika oddziałują różne siły w zależności od umiejscowienia na statywie oraz miejsca montażu w konkretnych odcinkach taśmociągu. Szczególnie duży wpływ na oddziałujące siły mają zakrzywienia trasy i samego statywu krążników. Ścisłe skorelowanie Występujących sił (punkt 3.2) z oczekiwanym czasem życia krążników powoduje konieczność stworzenia grup, które następnie będą analizowane pod kątem ryzyka awarii. Aby wyznaczyć odpowiednie grupy proponuje się uwzględnić lokalizację krążniki na statywie oraz lokalizację na trasie przenośnika ze szczególnym uwzględnieniem odcinków zakrzywionych. W następnym kroku proponuje się pogrupować krążniki względem sił działających prostopadle oraz równolegle względem osi krążniki. Proponowana procedura grupowania została przedstawiona na rysunku nr 10.12.



Rysunek 10.22 Procedura wyznaczania grup krążników.

10.4.3. Algorytm podejmowania decyzji

Zasadniczym problemem podczas wykonywania przeglądów jest wytypowanie krążników wymagających wymiany. O ile wykrycie samej awarii nie powoduje znacznych trudności o tyle wytypowanie krążników na wczesnym etapie degradacji bywa kłopotliwe. Z tego powodu stworzenie algorytmu wspomagającego proces podejmowania decyzji podczas serwisu znacząco podnosi niezawodność urządzenia oraz ogranicza ilość nadmiarowo wymienionych podzespołów.

Działanie algorytmu opiera się na kilku filarach tj: pomiarach parametrów przenośnika, wyznaczeniu sił oddziaływujących na krążniki przenośnika, wyznaczeniu teoretycznego czasu życia krążników, dopasowaniu akceptowalnych odchyłek parametrów krążników oraz dopasowywaniu modelu teoretycznego czasu życia krążników.

Dane pomiarowe dzieli się na dwie kategorie: zbierane ciągle oraz zbierane podczas wykonywania przeglądu. Do danych zbieranych ciągle należą parametry operacyjne przenośnika: ilość materiału, prędkość transportowa, temperatura zewnętrzna, napięcie wstępne oraz moment obrotowy kół pasowych. Do danych zbieranych podczas przeglądów należą wartości temperatury, poziomu wibracji, natężenia dźwięku oraz poziom oddziaływania tła. Ponieważ na danych instalacjach mogą nie być dostępne pomiary w pełnym zakresie algorytm został tak zaprojektowany, aby mógł działać również na okrojonym zestawie danych wejściowych. Oznacza to, że w przypadku braku możliwości pomiarów poziomu wibracji, algorytm będzie dalej mógł pracować wyłącznie na danych odnośnie do poziomu natężenia dźwięku i temperatury.

W celu odseparowania krążników pracujących z różnym obciążeniem oraz w różnych warunkach zewnętrznych zaproponowano podział populacji krążników na grupy zgodnie z punktem 3.4. Następnie podczas wykonywania przeglądu algorytm wyznaczy medianę wartości poziomów badanych zjawisk oraz wyznaczy dopuszczalną odchyłkę. Poziom dopuszczalnej odchyłki powinien zostać skorygowany w oparciu o trafność poprzednich estymacji. Jako wskaźnik zaproponowane zostało odchylenie od mediany wartości parametrów w danej grupie, które jest oznaczone jako $\Delta H_{m,k,i}$, a $\Delta H'_{m,k,i}$ jest wartością korekcji. Natomiast k oznacza numer grupy, m rodzaj pomiaru, i indeks okresu danego przeglądu. Po każdym przeglądzie wartość dopuszczalnej odchyłki powinna zostać skorygowana w celu dopasowania rzeczywistej liczby krążników wymagających wymiany tak, aby uniknąć niepotrzebnej wymiany sprawnych krążników a jednocześnie, aby uniknąć awarii i przerw w pracy taśmociągu.

$$\Delta H_{m,k,i} = \Delta H_{m,k,i-1} + \Delta H'_{m,k,i} \quad (10.20)$$

W celu wyznaczenia wartości korekcji $\Delta H'_{m,k,i}$ proponuje się wyznaczyć różnicę pomiędzy wszystkimi wymienionymi krążnikami w danej grupie od czasu wykonania poprzedniego przeglądu $f'_{m,k}(t_i)$, a liczbą krążników przewidzianych do wymiany. Procedurę należy wykonać zgodnie z modelem teoretycznym $f_{t,m,k}(t_i)$. Gdzie $f'_{m,k}(t_i)$ jest liczbą

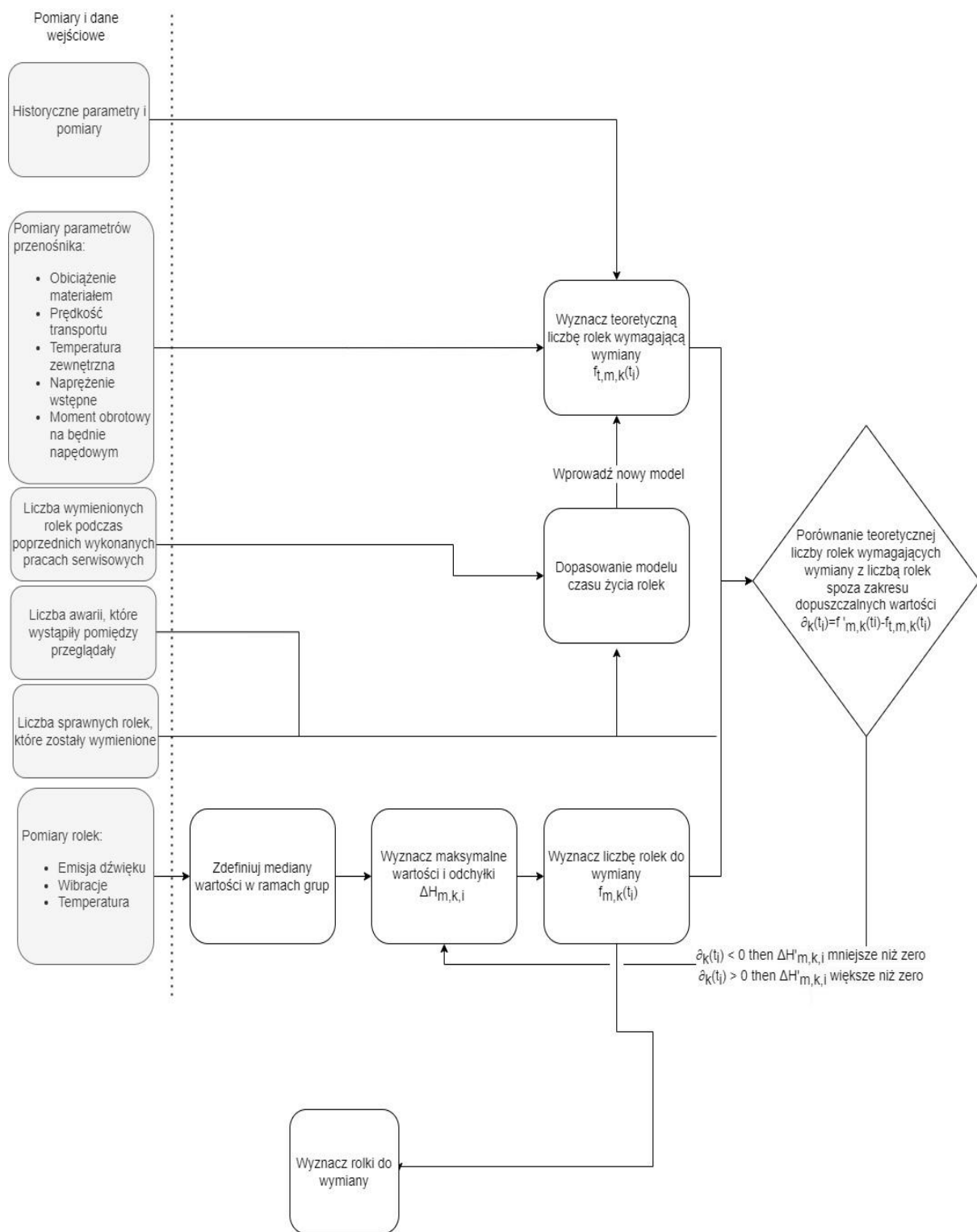
krążników z parametrami przekraczającymi aktualną dopuszczalną odchyłkę $f_{m,k}(t_i)$, która jest skorygowana o liczbę awarii występującą w okresach pomiędzy przeglądowych oraz nadmiarowo wymienionych krążników.

$$\partial_k(t_i) = f'_{m,k}(t_i) - f_{t,m,k}(t_i) \quad (10.21)$$

Model wyznaczający teoretyczną liczbę krążników wymagających wymiany został opisany w punktach od 10.4.1 do 10.4.3. Zaletą proponowanego algorytmu jest możliwość dopasowywania modelu w trakcie pracy monitorowanej instalacji. Autorzy rekomendują użycie rozkładu Weibull. Niemniej jednak ze względu na modułową budowę proponowanego rozwiązania istnieje także możliwość zastosowania innych modeli np. rozkładu Poissona lub innych modeli analitycznych lub algorytmów uczenia maszynowego.

Całość algorytmu podlega dopasowaniu do rzeczywistych warunków na podstawie:

- liczby rzeczywiście wymienionych krążników wraz z uwzględnieniem nadmiarowo wymienionych krążników,
- czasu pracy rzeczywiście wymienionych krążników w stosunku do prognozowanych,
- modyfikacji wartości względnych odchyłek mierzonych parametrów.



Rysunek 10.23 Algorytm podejmowania decyzji podczas inspekcji taśmociągu.

10.4.4. Wyniki symulacji

Rezultaty badania zawierają dwie składowe. Pierwsza są to pomiary rzeczywistych parametrów przenośnika taśmowego zlokalizowanego w Chinach, a opisanego w punkcie 3. Druga składowa są to obliczenia analityczne sił działających na krążniki przenośnika oraz symulacje działania algorytmu wraz z symulacjami awarii krążników i przeglądów przenośnika. Ze względu na zaawansowany algorytm symulacja została stworzona jako osobna aplikacja napisana w środowisku .Net.

Parametry operacyjne przenośnika zostały opisane w tabeli 10.2.

Prędkość transportowa	5 m/s
Przepustowość	2400 t/h
Odległość pomiędzy statywami	1.5 m
Długość przenośnika	12461 m
Całkowita moc silników	3480 kW
Szerokość taśmy	1.2m

Tabela 10.7 Parametry pracy przenośnika.

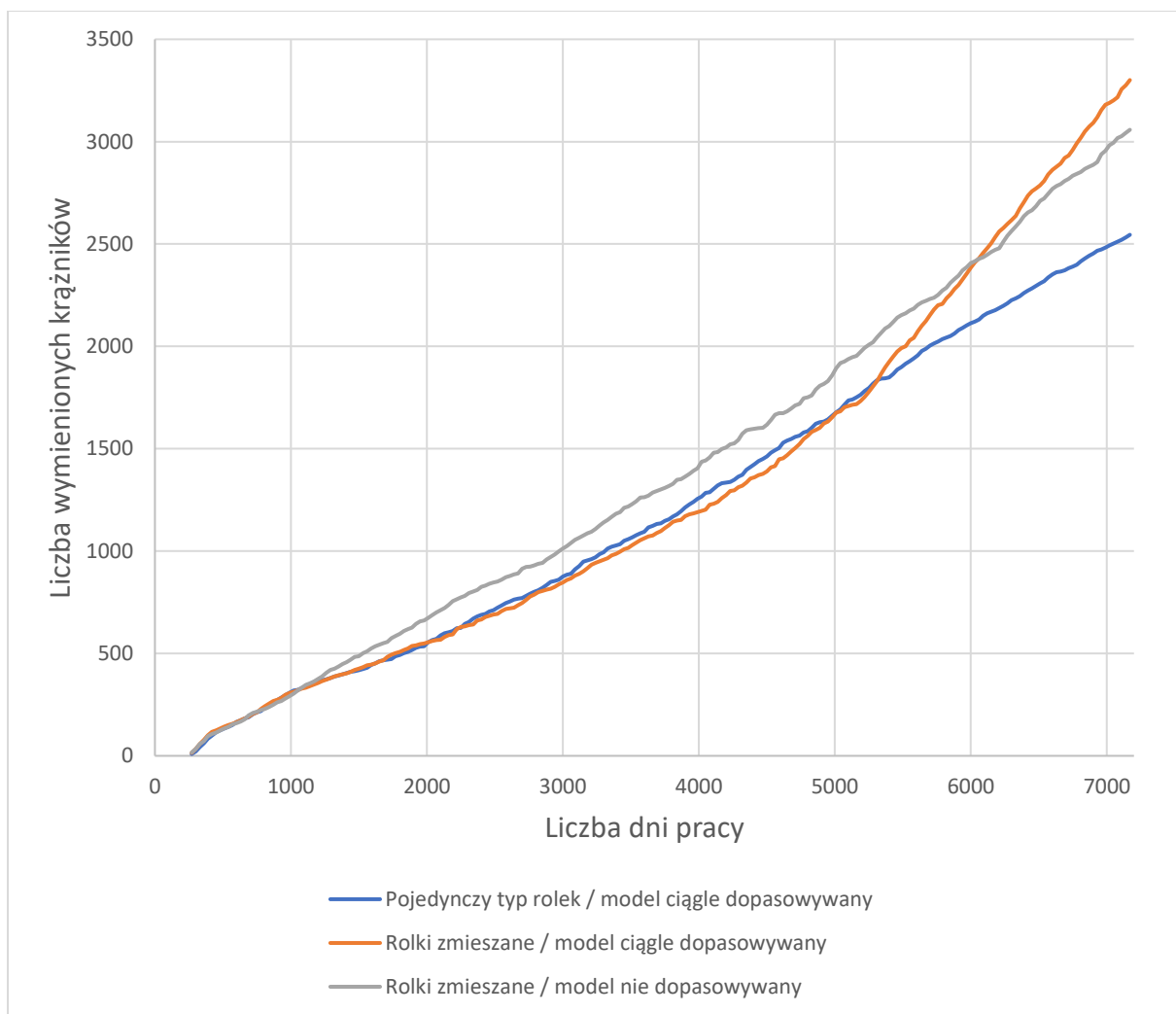
Na podstawie przedstawionych parametrów operacyjnych i geometrycznych przenośnika dokonano obliczeń sił oddziaływujących na krążniki przenośnika w sekcji zawierające łuk o promieniu 1000m oraz sekcji prostej. W Tabeli 10.7 zebrano wyniki obliczeń. Po uwzględnieniu przesunięcia materiału wyraźnie widać, iż krążniki umieszczone na łukach po jego zewnętrznej stronie (pozycja krążniki - prawa) są bardziej obciążone niż krążniki umieszczone po stronie wewnętrznej (pozycja krążniki - lewa) w efekcie czego prognozowany czas pracy krążników jest znacząco krótszy. W obu przypadkach najbardziej obciążone są krążniki środkowe. Taki rozkład sił dowodzi, iż rozważając czas pracy poszczególnych krążników należy rozpatrywać pozycję na statywach oraz geometrię taśmociągu.

Pozycja krążniki na statywie	Pozycja łożyska	Odziaływujące Siły [N]		L10h	
		Prosta	Łuk	Prosta	Łuk
Lewa (c)	1	364.79	211.06	184000	250000
	2	422.74	329.42	119000	200000
Prawa (b)	1	422.74	491.86	119000	75600
	2	364.79	561.95	184000	50700
Środkowa (a)	1	837.13	823.11	20700	20700
	2	837.13	823.11	20700	20700

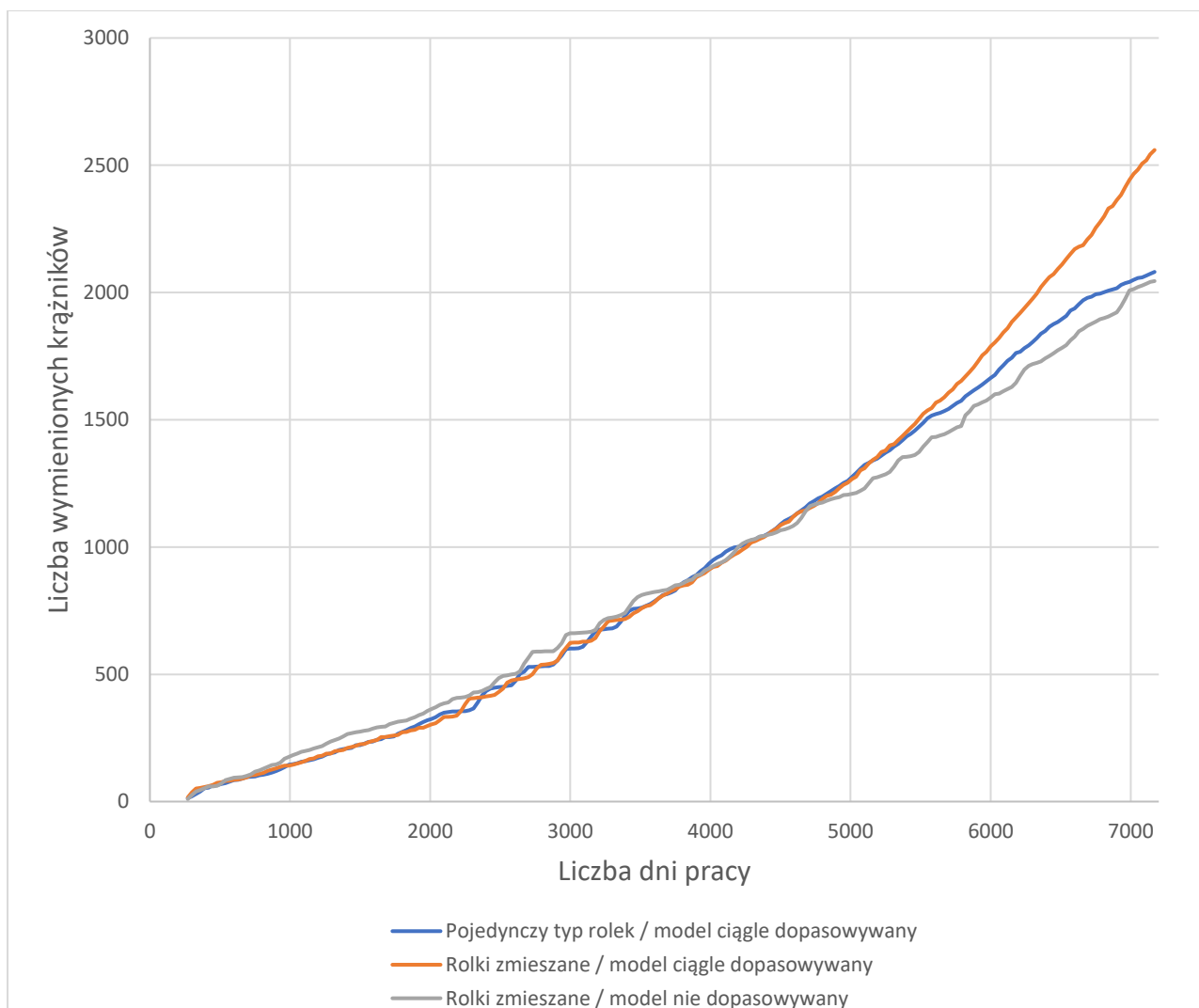
Tabela 10.8 Siły odziaływujące na łożyska w krążnik oraz L10h w nominalnych parametrach pracy przenośnika.

Ze względu, iż przenośniki są instalacjami bardzo trwałymi oraz jednocześnie uwzględniając fakt, iż awarii krążniki w zależności od lokalizacji może mieć fatalne skutki, symulacja obejmuje 7100 dni pracy. Tak długi okres symulacji wynika z charakterystyki badanego przenośnika, który został zbudowany w 2008 roku, a więc do czasu publikacji pracuje on już 16 lat. Symulacja dodatkowo obejmuje również zmianę charakterystyki krążników montowanych na przenośniku. Uwzględnienie montażu innego rodzaju krążników wynika z doświadczeń instalacyjnych, a mianowicie w badanym przypadku wymagane było zamontowanie krążników innego producenta ze względu na konieczność ograniczenia hałasu generowanego podczas pracy.

Na rysunku 10.24 przedstawiono wyniki całkowitej ilości wymienionych krążników wewnątrz zdefiniowanych grup tj. dla krążników jednego typu w danej grupie i z modelem podlegającym dopasowaniu, z krążnikami różnego typu wewnątrz grupy i z modelem podlegającym dopasowaniu oraz z modelem nie podlegającym dopasowaniu. Montaż krążników o innej charakterystyce został zapoczątkowany w połowie badanego okresu. Rysunek 10.24 ukazuje przypadek, w którym na początku nie jest znana dystrybucja awarii co wymusza dopasowanie modelu na podstawie statystycznie znaczącej próbki. Próbkę uzyskana po 1200 dniach pracy i od tego momentu następuje rozejście się wykresów pomiędzy modelem dopasowanym a nie dopasowanym. Na rysunku nr 10.25 przedstawiono analogiczną symulację z uwzględnieniem znanej dystrybucji awarii krążników. Wszystkie badania, których wyniki przedstawiono na rysunku nr 10.24 i 10.25 odnoszą się do roli środkowej (pozycja a)

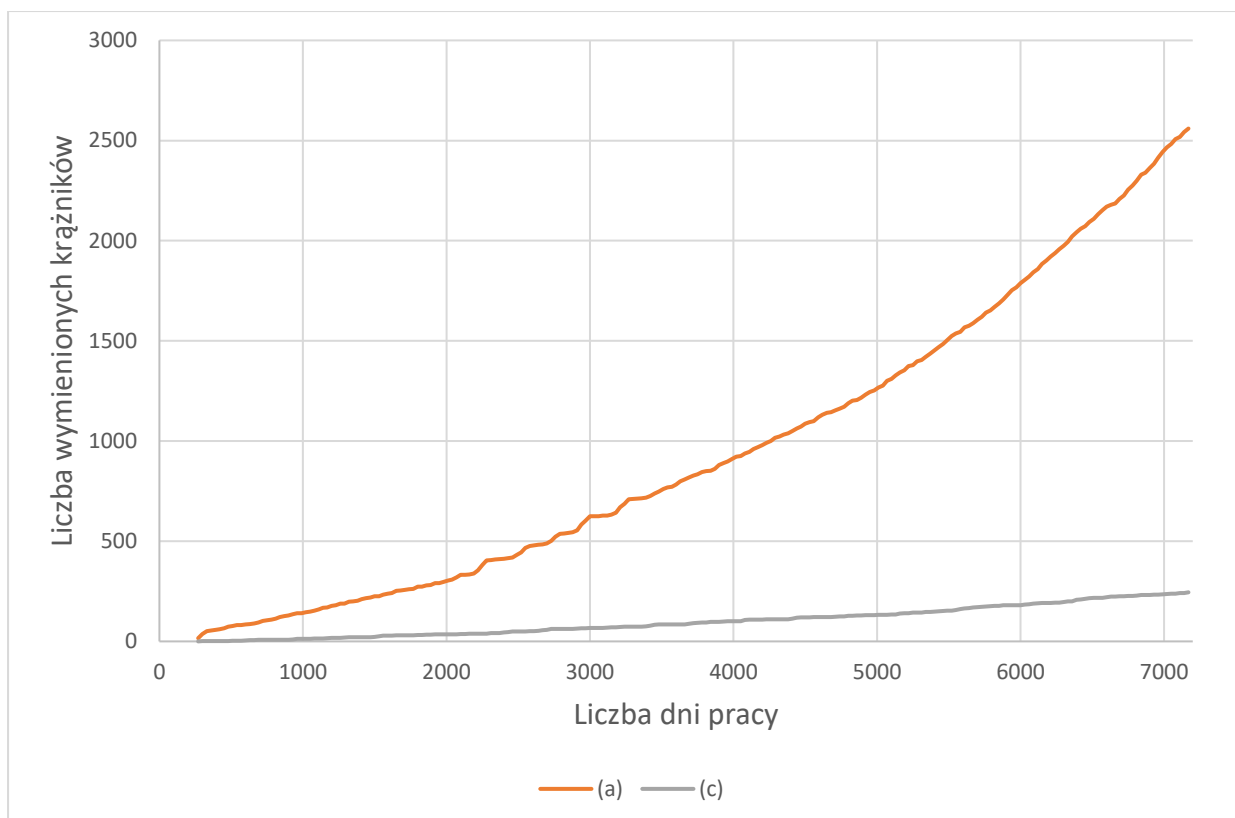


Rysunek 10.24 Sumaryczna liczba wymienionych krążników w przypadku braku znajomości dystrybucji awarii.



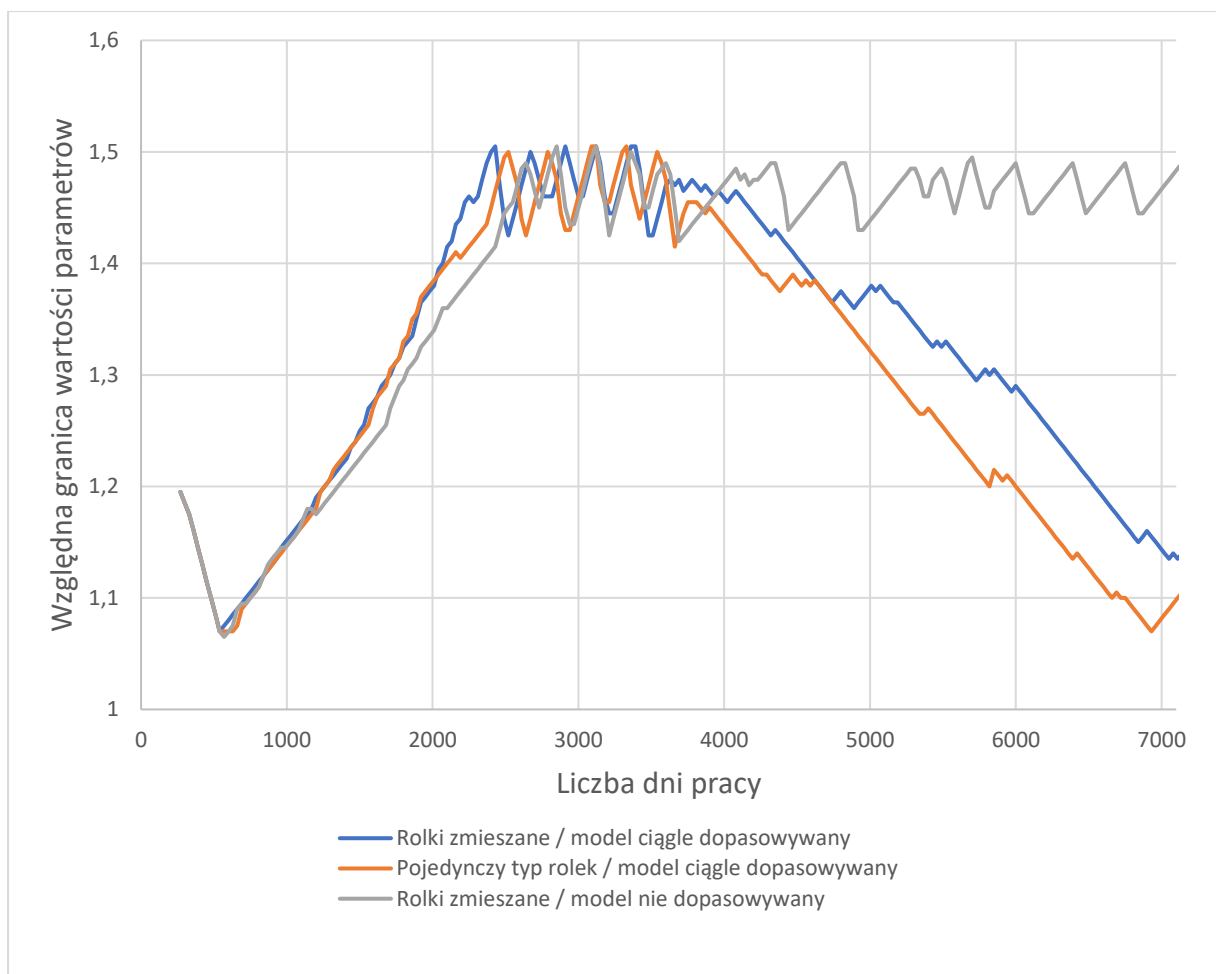
Rysunek 10.25 Sumaryczna liczba wymienionych krążników w przypadku znajomości dystrybucji awarii.

Na rysunku nr 10.26 przedstawiona jest wynik symulacji awarii krążników z uwzględnieniem rozróżnienia położenia krążników na statywie. Z analizy wynika, iż miejsce umieszczenia krążnika ma bardzo duże znaczenie w kontekście analizy ryzyka awarii. Sumaryczna ilość awarii dla krążników środkowych (pozycja c) dla takiej samej ilości krążników w danej populacji wynosi ponad 2500 sztuk natomiast dla krążników umieszczonych na boku statywu (pozycja c) całkowita ilość wymienionych krążników wynosi niespełna 250 sztuk.



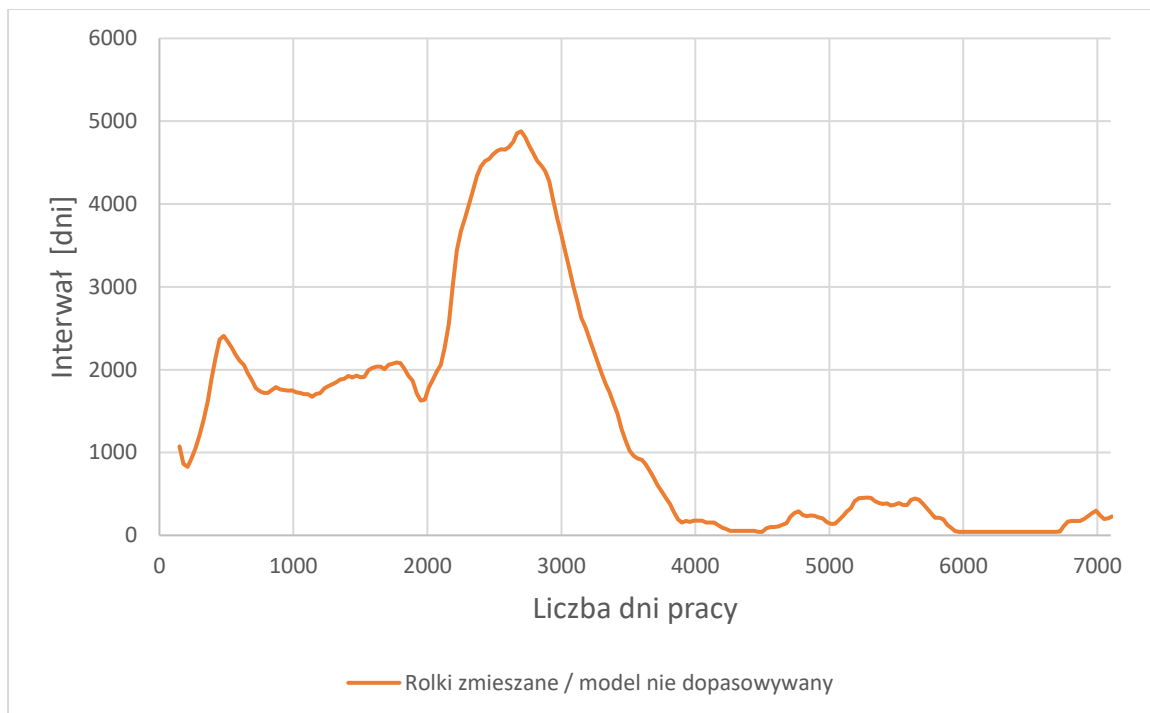
Rysunek 10.26 Sumaryczna liczba wymienionych krążników dla różnych położeń badanych krążników.

Na rysunku nr 10.27 przedstawiona rozwój względnych dopuszczalnych odchyłek maksymalnych dla trzech uwzględnianych parametrów. Wnioski płynące z wartości nie są uniwersalne, ponieważ silnie zależą od parametrów symulacji, a także od konkretnych warunków pracy zarówno zewnętrznych jak i związanych z parametrami przenośnika. Wartością uniwersalną jest natomiast fakt, iż stosowanie wartości względnych pozwala jednocześnie ograniczyć nadmiarowo wymieniane krążniki oraz ilość awarii powodujących zatrzymanie przenośnika. Dzieje się tak ponieważ założenie niskiej dopuszczalnej odchyłki powoduje usunięcie sprawnych elementów natomiast przyjęcie zbyt dużej powstanie znacznej ilości awarii wymagających przestojów awaryjnych. W całym badanym okresie w przypadku modelu podlegającemu dopasowaniu uzyskano w symulacji 79 przypadków takich awarii natomiast w przypadku modelu niepodlegającemu dopasowaniu aż 129.



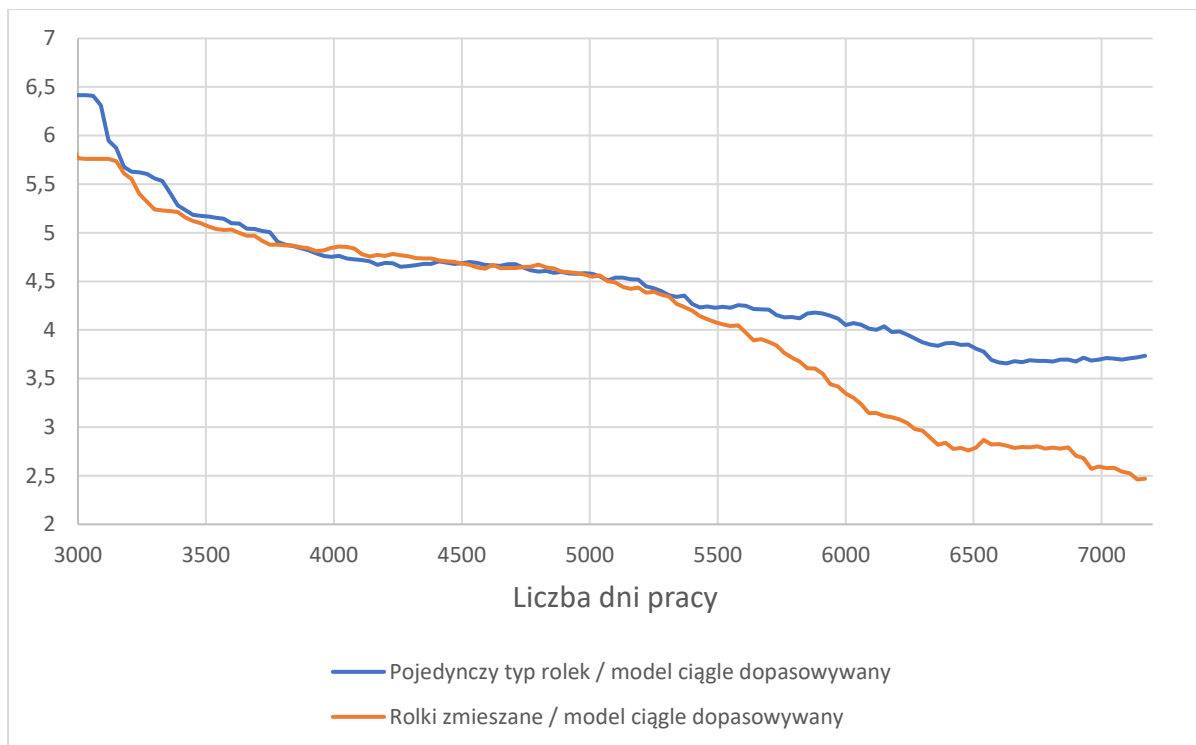
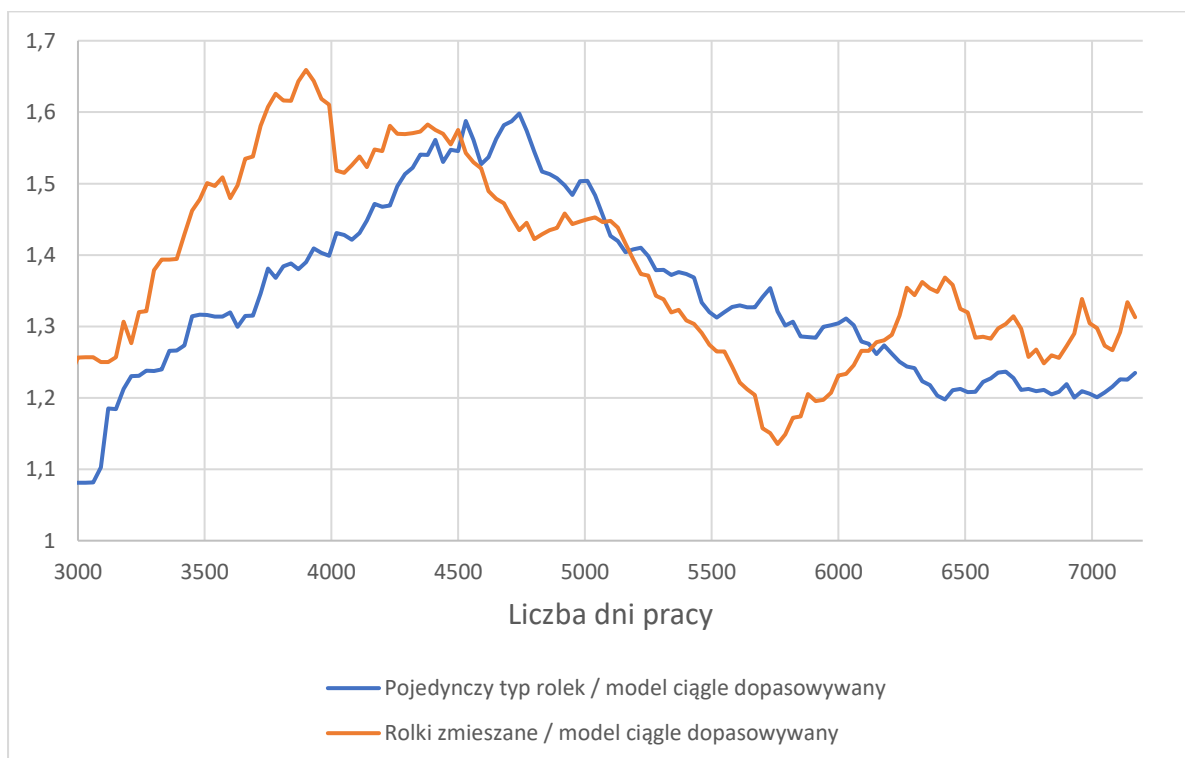
Rysunek 10.27 Względna akceptowalna różnica względem stanu normalnej pracy.

Na rysunku 10.28 przedstawiono wykres oczekiwanego czasu jakie jest potrzebny, aby 3% krążników uległo uszkodzeniu. Na wykresie w pierwszej połowie widoczne są znaczne okresy potrzebne, aby nastąpiły wystąpiły uszkodzenia krążników. Wyniki w pełni pokrywają się z danymi pomiarowymi z przenośnika. Mianowicie w dotychczasowej pracy tj. 16 latach ilość krążników wymagających wymiany wynosiła rocznie maksymalnie 1%. Zauważalny wzrost wymaganych interwałów wynika z montażu nowych krążników. Natomiast w drugiej części okresu przeprowadzonej symulacji czas pomiędzy spada, ponieważ krążniki dobiegają końca okresu swojej sprawności i wymagają wymiany na nowe. Jest to również widoczne na rysunku nr 10.29 w którym algorytm staje się dużo bardziej wrażliwy na anomalie.



Rysunek 10.28 Przewidywana okres, w którym nastąpi awaria 3% krążników.

Ponieważ badany algorytm opiera się na dopasowaniu modeli na podstawie rzeczywiście wymienionych krążników w całym okresie symulacji parametry rozkładu Weibull ulegały zmianie. Na rysunkach nr 10.29 i 10.30 przedstawiono zmiany współczynnika α i β . Zmiany pokazane są od 3000 dnia pracy, ponieważ dopasowanie modelu rozpoczyna się po zebraniu statystycznie znaczącej próbki danych pomiarowych. Na przedstawionych wykresach wyraźnie odznacza się w drugiej połowie symulacji zmiana parametrów pomiędzy grupą zawierającą krążniki jednego typu oraz grupą zawierającą krążniki mieszane, ponieważ zgodnie z symulacją drugi rodzaj krążników zaczął być montowany w drugiej części symulacji. Symulacja dowodzi, iż model ulega poprawnemu dopasowaniu.

Rysunek 10.29 Zmiany współczynnika α rozkładu Weibull.Rysunek 10.30 Zmiany współczynnika β rozkładu Weibull

W rozdziale zastał zaprezentowany innowacyjny algorytm podejmowania decyzji związanych z inspekcją krążników przenośników taśmowych. Proponowana idea znacząco rozszerza dotychczasowe koncepcje w szczególności w aspekcie uwzględnienia zmiennych warunków pracy urządzenia, charakterystyki rozkładu obciążeń, umożliwienia dostosowania mierzonych wartości do technicznych możliwości danej instalacji oraz co najważniejsze wprowadza metody automatycznego dopasowywania się algorytmu.

Przeprowadzone symulacje potwierdziły możliwość stworzenia algorytmu wspomagającego decyzje dotyczące przeglądów krążników przenośnika w taki sposób, aby zapewnić dużą niezawodność i ciągłość pracy urządzenia.

Dzięki uwzględnieniu różnego zestawu danych pomiarowych krążników przenośników można zastosować ograniczoną ilość sensorów. Niemniej jednak jest to związane z ograniczeniem pewności co do niezawodności przenośnika.

Proponowane podejście może znacząco wpłynąć na zmniejszenie ryzyka krytycznych awarii oraz możliwość zaplanowania przeglądów w odpowiednich interwałach czasowych.

W ramach kolejnych badań proponuje się sprawdzenie w jaki sposób ograniczenie ilości danych pomiarowych wpływa na pewność typowania krążników do wymiany oraz niezawodność urządzenia oraz sprawdzenie innych rodzaj modeli symulujących rozkład awarii krążników przenośnika.

W przyszłości planuj się również dalsze monitorowanie badanego przenośnika w celu sprawdzenia poprawności dopasowania modelu oraz ilości awarii krążników.

11. Podsumowanie i wnioski

- I. Niniejsza praca powstała w ramach programu wdrożeniowego, którego celem jest stworzenie innowacyjnych narzędzi służących do wspomagania monitorowania przenośników taśmowych oferowanych przez firmę BEUMER. Program ten ma na celu nie tylko poprawę efektywności i niezawodności przenośników, ale również integrację nowoczesnych technologii z istniejącymi systemami w celu stworzenia bardziej zaawansowanych i kompleksowych rozwiązań.
- II. Praca skupia się na przenośnikach taśmowych przeznaczonych do transportu materiałów sypkich. Analizy przeprowadzone w ramach pracy dotyczą przede wszystkim przenośników o znacznych rozmiarach i skomplikowanej geometrii, które są powszechnie stosowane w przemyśle wydobywczym, energetycznym, cementowym oraz innych branżach wymagających transportu dużych ilości materiałów na duże odległości. Przenośniki te są kluczowymi elementami infrastruktury przemysłowej, dlatego ich niezawodność i efektywność operacyjna mają bezpośredni wpływ na produktywność i rentowność zakładów.
- III. W ramach pracy przeanalizowano potrzeby oraz braki lub niedoskonałości istniejącej diagnostyki przenośników taśmowych. Analizy te zostały przeprowadzone poprzez szczegółowe studia literaturowe, analizę istniejących rozwiązań na rynku oraz badanie wiedzy i oczekiwań przedstawicieli firmy BEUMER. Podejście to umożliwiło dokładne zidentyfikowanie obszarów wymagających poprawy oraz określenie, w jaki sposób nowoczesne technologie mogą zostać zaadaptowane w celu ulepszenia istniejących systemów monitorowania.
- IV. Rozwiązania zaprezentowane w pracy mieszczą się w koncepcji Przemysłu 4.0, która zakłada szerokie wykorzystanie technologii cyfrowych do automatyzacji i optymalizacji procesów przemysłowych. Obejmują one wiele nowoczesnych rozwiązań informatycznych, takich jak analiza danych w czasie rzeczywistym, systemy IoT oraz zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego. Te rozwiązania, w połączeniu z istniejącymi technologiami, umożliwiają implementację cyfrowego bliźniaka przenośnika taśmowego. Cyfrowy bliźniak to wirtualny model fizycznego systemu, który pozwala na monitorowanie, analizowanie i optymalizowanie jego działania w czasie rzeczywistym. Dzięki temu możliwe jest przewidywanie potencjalnych awarii oraz planowanie działań serwisowych z wyprzedzeniem, co znacząco zmniejsza ryzyko nieplanowanych przestojów.
- V. Badania zaprezentowane w pracy dotyczą głównie przenośnika zlokalizowanego w terenie górzystym w prowincji Syczuan w Chinach. Badany obiekt został zbudowany w 2008 roku i służy do transportu wapienia na

odległość ponad 12 km. Przenośnik ten, ze względu na swoje wymagające warunki eksploatacji oraz długość, stanowi doskonały obiekt na którym można zastosować nowoczesne techniki monitorowania i diagnostyki. Szczegółowy opis tego przenośnika znajduje się w punkcie 3, gdzie omówiono jego konstrukcję, warunki pracy oraz wyzwania związane z jego eksploatacją. W rozdziale 10.3, w którym wykorzystano model krótszego i prostszego przenośnika. Zdaniem autora, w tym przypadku prostszy model lepiej ilustruje zjawisko przesunięcia taśmy, ponieważ nie posiada on dedykowanych mechanizmów zabezpieczających.

- VI. W rozdziale 4 przedstawiono użyte rozwiązania służące do zbierania i agregacji danych. W celu przesyłania danych z instalacji przenośnika wykorzystano zaawansowane rozwiązania klasy Internet Rzeczy (IoT). Dzięki zastosowaniu technologii IoT możliwe jest ciągłe monitorowanie parametrów pracy przenośnika oraz przesyłanie tych danych do centralnych systemów analitycznych. Następnie dane te są przetwarzane przy użyciu narzędzi służących do dystrybucji przekazywanych informacji oraz narzędzi do przechowywania, prezentacji i agregacji zebranych danych. Wykorzystane technologie umożliwiają integrację danych z różnych źródeł, co pozwala na kompleksową analizę i wyciąganie wniosków dotyczących stanu technicznego przenośników. Dzięki temu możliwe jest wprowadzenie zaawansowanych metod profilaktyki awarii, co znacząco zwiększa niezawodność i efektywność systemów transportowych.
- VII. W ramach prac badawczych i wdrożeniowych przeanalizowano, zaprojektowano i stworzono innowacyjne narzędzia służące do projektowania i tworzenia modeli trójwymiarowych przenośników taśmowych (rozdział 5). Dzięki wprowadzeniu narzędzia czas potrzebny na stworzenie modelu przenośnika taśmowego uległ znacznemu skróceniu oraz jednocześnie zebrane dane mogą posłużyć jako jedna z części składowych cyfrowego bliźniaka.
- VIII. W dalszej kolejności stworzono autorski algorytm obliczeń analitycznych (rozdział 6). Algorytm bazuje na badaniach naukowych oraz wiedzy i doświadczeniu będącej w posiadaniu firmy BEUMER, która wynika z doświadczeń projektowych oraz operacyjnych. Algorytm pozwala na wyznaczenie oporów, sił oraz naprężeń występujących na przenośniku. Algorytm znajduje zastosowanie zarówno na etapie projektowania jak i obsługi przenośnika.
- IX. W pracy wprowadzono również metody dopasowania modelu analitycznego przenośnika do rzeczywistych instalacji tak aby było możliwe modelowanie sił, oporów i naprężeń występujących podczas pracy przenośnika (rozdział 7). Metody zawarte w pracy są uniwersalne i mogą być również użyte w przypadku zmiany parametrów podlegających na dopasowaniu w wyniku zmiany metody obliczeń analitycznych.

- X. W ramach pracy zaproponowano architekturę systemu informatycznego pozwalającego na wspomaganie monitorowania przenośnika taśmowego (rozdział 8). Jej mocną stroną jest elastyczność pozwalająca na modyfikację lub podmianę elementów składowych bez wpływu na pozostałą część systemu.
- XI. W rozdziale 9 zaproponowano stworzenie cyfrowego bliźniaka przenośnika taśmowego w oparciu o pomiary, model przenośnika i obliczenia analityczne. Dzięki takiemu połączeniu istnieje możliwość przedstawienia w sposób wyczerpujący wszystkich parametrów operacyjnych przenośnika, tak aby było możliwe zastosowanie technik pozwalających na profilaktykę awarii.
- XII. W pracy w rozdziale 10 zaproponowano metody pozwalające na przewidywanie ryzyka awarii. W pierwszej kolejności w oparciu o metody uczenia maszynowego i historyczne dane pomiarowe stworzono procedurę szacowania wymaganej mocy silników (rozdział 10.1). Oszacowanie mocy silników jest niezbędne w celu szacowania ryzyka awarii w oparciu o obliczenia analityczne.
- XIII. W rozdziale 10.2 przedstawiono autorską metodę detekcji ryzyka obrotu pasa. Obrót pasa był rzeczywistym problemem występującym na badanym przenośniku. Metoda detekcji ryzyka opiera się wykorzystaniu uczenia maszynowego, pomiarów i obliczeń analitycznych. Całość została sprzężona z algorytmem podejmowania decyzji. Badania i symulacje potwierdziły, iż proponowana metoda może wspomagać utrzymanie przenośników taśmowych poprzez redukcję ryzyka obrotu pasa.
- XIV. W rozdziale 10.3 przedstawiono autorską metodę detekcji ryzyka zbyt dużego przesunięcia pasa. Detekcja przesunięcia korzysta z takich samych metod obliczeniowych jak w przypadku detekcji ryzyka obrotu pasa. Metody te zostały również związane z algorytmem podejmowania decyzji. Badania symulacyjne potwierdziły, iż metody analityczne zaproponowane w pracy mogą redukować ryzyko zbyt dużego przesunięcia pasa.
- XV. W rozdziale 10.4 przedstawiono innowacyjne rozwinięcie metod podejmowanie decyzji odnośnie metod kwalifikacji rolek podlegających wymianie. W ramach analizy algorytm podejmowania decyzji uzupełniono o parametry operacyjne krążników, uwzględniono czas montażu krążników, wprowadzono mechanizmy dopasowywania modelu w oparciu o rzeczywiste czasy pracy krążników oraz wprowadzono względną różnicę parametrów pomiarowych będących kryterium kwalifikacji do wymiany.
- XVI. Praca potwierdza postawione tezę, iż istnieje możliwość stworzenia mechanizmów wspomagających utrzymanie przenośnika poprzez wprowadzenie modelu przenośnika, powiązanych z nim obliczeń analitycznych uzupełnionych o metody uczenia maszynowego.

Bibliografia

- [1] F. Kurth, *Fördertechnik Stetigförderer*, 4th ed. 1967.
- [2] Z.-R. A. Rumin Przemysław, Kotowicz Janusz, "Wybrane techniki monitorowania stanu przenośników taśmowych," *Rynek Energii*, vol. 4 (149), no. 1425–5960, pp. 57–61, 2020.
- [3] V. Molnár, G. Fedorko, M. Andrejiová, and A. Grinc, "Online monitoring of a pipe conveyor . Part I : Measurement and analysis of selected operational parameters," vol. 94, pp. 364–371, 2016.
- [4] V. Molnár, G. Fedorko, M. Andrejiová, and A. Grinc, "Online monitoring of pipe conveyors part II : Evaluation of selected operational parameters for the design of expert system," vol. 104, pp. 1–11, 2017.
- [5] B. Žužek and J. Burja, "Failure of a coal transportation conveyor belt pulley," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 106, 2019.
- [6] J. Homišin, R. Grega, P. Kaššay, G. Fedorko, and V. Molnar, "Removal of systematic failure of belt conveyor drive by reducing vibrations," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 99, 2019.
- [7] X. Jiang and G. Cao, "Belt conveyor roller fault audio detection based on the wavelet neural network," 2015, pp. 954–958.
- [8] "Steelcord Conveyor Belts Manufacturer - Conveyor Systems (continental-industry.com)," <https://www.continental-industry.com/en/solutions/conveyor-belt-systems/material-handling/steel-cord-conveyor-belts>. .
- [9] P. Bortnowski, W. Kawalec, R. Król, and M. Ozdoba, "Identification of conveyor belt tension with the use of its transverse vibration frequencies," *Measurement*, vol. 190, p. 110706, 2022.
- [10] "Kiepe Elektrik," <https://www.kiepe-elektrik.com/products/belt-monitoring>. .
- [11] "Wm. Neundorfer & Co.," <https://wmneundorfer.com/products/belt-scales-switches>. .
- [12] "Conveyor Components Comapany," <https://www.conveyorcomponents.com/>. .
- [13] "Bramco Electronics," <http://www.bramcoelectronics.com/product/brc1-belt-rip-detector>. .
- [14] "ARCH," <https://archenvironmental.com/products/belt-personal-protection/>. .
- [15] "Matsushima Measure Tech Co," <https://sensing.matsushima-m-tech.com/en/product/safety/vertical-tear-detection>. .
- [16] "Becker Mining," <https://www.becker-mining.com/en>. .
- [17] "Continental Industry," <https://www.continental-industry.com/en>. .
- [18] "REMA TipTop," https://www.rema-tiptop.de/fileadmin/data/common/downloads/brochures%20neu/5820031_REMA_mcube_EN.pdf. .
- [19] "BeltScan," <https://www.beltscan.com/products/belt-guard-10k-rip-detector-for-steel-cord-belts.html>. .
- [20] G. Fedorko, V. Molnar, M. Dovica, T. Toth, and M. Kopas, "Analysis of pipe conveyor belt damaged by thermal wear," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 45, pp. 41–48, 2014.
- [21] Y. Guan and J. Zhang, "Embedded Sensor of Forecast Conveyer Belt Breaks," pp. 617–

- 621, 2008.
- [22] J. Leite, D. Cavalieri, and A. Prado, "Efficient monitoring of longitudinal tears in conveyor belts using 2D laser scanner and statistical methods," *Measurement*, vol. 227, p. 114225, 2024.
- [23] Y. Wang, C. Miao, Y. Liu, and D. Meng, "Research on a sound-based method for belt conveyor longitudinal tear detection," *Measurement*, vol. 190, no. January, p. 110787, 2022.
- [24] D. Valis, D. Mazurkiewicz, and M. Forbelská, "Modelling of a transport belt degradation using state space model," in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2017, pp. 949–953.
- [25] Y. Pang and G. Lodewijks, "A Novel Embedded Conductive Detection System for Intelligent Conveyor Belt Monitoring," 2006.
- [26] R. Yang, T. Qiao, Y. Pang, Y. Yang, H. Zhang, and G. Yan, "Infrared spectrum analysis method for detection and early warning of longitudinal tear of mine conveyor belt," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 165, p. 107856, 2020.
- [27] M. Zhang *et al.*, "A new paradigm for intelligent status detection of belt conveyors based on deep learning," *Measurement*, vol. 213, p. 112735, 2023.
- [28] J. Chamorro *et al.*, "Health monitoring of a conveyor belt system using machine vision and real-time sensor data," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 38, pp. 38–50, 2022.
- [29] C. Hou, T. Qiao, H. Zhang, Y. Pang, and X. Xiong, "Multispectral visual detection method for conveyor belt longitudinal tear," *Measurement*, vol. 143, pp. 246–257, 2019.
- [30] J. Che, T. Qiao, Y. Yang, H. Zhang, and Y. Pang, "Longitudinal tear detection method of conveyor belt based on audio-visual fusion," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 176, no. January, pp. 1–12, 2021.
- [31] M. Zhang, H. Shi, Y. Zhang, Y. Yu, and M. Zhou, "Deep learning-based damage detection of mining conveyor belt," *Measurement*, vol. 175, p. 109130, 2021.
- [32] M. Andrejiova, A. Grincova, and D. Marasova, "Identification with machine learning techniques of a classification model for the degree of damage to rubber-textile conveyor belts with the aim to achieve sustainability," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 127, no. June, p. 105564, 2021.
- [33] G. Fedorko, V. Molnar, B. Stehlikova, P. Michalik, and J. Saliga, "Design of Evaluation Classification Algorithm for Identifying Conveyor Belt Mistracking in a Continuous Transport System's Digital Twin," *Sensors*, vol. 24, no. 12, 2024.
- [34] M. Vasić, B. Stojanović, and M. Blagojević, "Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 117, no. August, p. 104898, 2020.
- [35] X. Liu, Y. Pang, G. Lodewijks, and D. He, "Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers," *Measurement*, vol. 127, no. May, pp. 277–282, 2018.
- [36] X. Liu, Y. Pang, G. Lodewijks, and D. He, "Experimental research on condition monitoring of belt conveyor idlers," *Measurement*, vol. 127, pp. 277–282, 2018.
- [37] Y. Liu, C. Miao, X. Li, J. Ji, and D. Meng, "Research on the fault analysis method of belt conveyor idlers based on sound and thermal infrared image features," *Measurement*, vol. 186, no. September, p. 110177, 2021.

- [38] A. Skoczylas, P. Stefaniak, S. Anufriev, and B. Jachnik, "Belt Conveyors Rollers Diagnostics Based on Acoustic Signal Collected Using Autonomous Legged Inspection Robot," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, 2021.
- [39] M. Fiset and D. Dussault, "Laboratory simulation of the wear process of belt conveyor rollers," *Wear*, vol. 162–164, pp. 1012–1015, 1993.
- [40] P. Dąbek, P. Krot, J. Wodecki, P. Zimroz, J. Szrek, and R. Zimroz, "Measurement of idlers rotation speed in belt conveyors based on image data analysis for diagnostic purposes," *Measurement*, vol. 202, p. 111869, 2022.
- [41] H. Faria *et al.*, "ROSI: a mobile robot for inspection of belt conveyor," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, pp. 10031–10036, 2020.
- [42] H. Wijaya, P. Rajeev, and E. Gad, "Distributed optical fibre sensor for infrastructure monitoring: Field applications," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 64, p. 102577, 2021.
- [43] H. Wijaya, P. Rajeev, E. Gad, and R. Vivekanantham, "Automatic fault detection system for mining conveyor using distributed acoustic sensor," *Measurement*, vol. 187, p. 110330, 2022.
- [44] C. Pan, X. Liu, H. Zhu, X. Shan, and X. Sun, "Distributed optical fiber vibration sensor based on Sagnac interference in conjunction with OTDR," *Opt. Express*, vol. 25, no. 17, p. 20056, 2017.
- [45] B. Schmidt and L. Wang, "Cloud-enhanced predictive maintenance," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, pp. 5–13, 2018.
- [46] A. Skoczylas, P. Stefaniak, W. Gryniewicz, and A. Rot, "The Concept of an Intelligent Decision Support System for Ore Transportation in Underground Mine," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 225, pp. 922–931, 2023.
- [47] P. Stefaniak, J. Wodecki, and R. Zimroz, "Maintenance Management of Mining Belt Conveyor System Based on Data Fusion and Advanced Analytics," in *Applied Condition Monitoring*, 2017, pp. 465–476.
- [48] H. Wang and J. Dai, "Research on the Reliability of Underground Coal Mine Belt Conveyor System," pp. 7636–7639, 2011.
- [49] K. S. Kiangala and Z. Wang, "An Effective Predictive Maintenance Framework for Conveyor Motors Using Dual Time-Series Imaging and Convolutional Neural Network in an Industry 4.0 Environment," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121033–121049, 2020.
- [50] S. Wang, W. Guo, W. Wen, R. Chen, T. Li, and F. Fang, "Research on belt conveyor monitoring and control system," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 105 CCIS, no. PART 1, pp. 334–339, 2010.
- [51] S. Kiangala and Z. Wang, "Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 97, pp. 1–21, 2018.
- [52] C. Yang, L. Bu, and B. Chen, "Energy modeling and online parameter identification for permanent magnet synchronous motor driven belt conveyors," *Measurement*, vol. 178, p. 109342, 2021.
- [53] C. Yuan, J. Ee, C. Heng, K. Kumar, and W. Hong, "Long-term predictive maintenance system with application and commercialization to industrial conveyors," 2024, pp. 179–191.
- [54] D. He, Y. Pang, and G. Lodewijks, "Green operations of belt conveyors by means of

- speed control," *Appl. Energy*, vol. 188, pp. 330–341, 2017.
- [55] B. I. Jefteni, "Implementation of Fuzzy Control to Improve Energy Efficiency of Variable Speed Bulk Material Transportation," vol. 59, no. 7, pp. 2959–2969, 2012.
- [56] D. H. Dinh, P. Do, and B. lung, "Multi-level opportunistic predictive maintenance for multi-component systems with economic dependence and assembly/disassembly impacts," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 217, no. September 2021, p. 108055, 2022.
- [57] G. Levitin, L. Xing, and Y. Dai, "Minimizing mission cost for production system with unreliable storage," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 227, no. July, p. 108724, 2022.
- [58] T. Benkedjouh, K. Medjaher, N. Zerhouni, and S. Rechak, "Remaining useful life estimation based on nonlinear feature reduction and support vector regression," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 7, pp. 1751–1760, 2013.
- [59] X. Liu, D. He, G. Lodewijks, Y. Pang, and J. Mei, "Integrated decision making for predictive maintenance of belt conveyor systems," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 188, no. March, pp. 347–351, 2019.
- [60] A. S. Morales *et al.*, "A Technology Review of Idler Condition based Monitoring Systems for Critical Overland Conveyors in Open - pit Mining Applications," pp. 5–10, 2017.
- [61] G. Fedorko, V. Molnár, M. Vasiľ, and R. Salai, "Proposal of digital twin for testing and measuring of transport belts for pipe conveyors within the concept Industry 4.0," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 174, no. January, 2021.
- [62] W. Hettler, "Beitrag zur Berechnung der Bewegungswiderstände von Gurtbandförderern mit dreiteiligen Tragrollenstationen. Dissertation Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg," Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, 1975.
- [63] K. . Grimmer, "Zwei Ausgewählte Probleme der Bandfördertechnik (Teil 2): Über den Sturzwiderstand bei Bandförderanlagen. Habilitationsschrift Universität Hannover," Universität Hannover, 1967.
- [64] L. Gładysiewicz, *Przenośniki taśmowe: teoria i obliczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [65] H. Limberg, "Untersuchung der trumbezogenen Bewegungswiderstände von Gurtförderanlagen. Dissertation Universität Hannover," Universität Hannover, 1988.
- [66] A. Greune, "Energiesparende Auslegung von Gurtförderanlagen. Dissertation Universität Hannover," Universität Hannover, 1989.
- [67] V. Molnar, G. Fedorko, B. Stehlíková, P. Michalik, and M. Kopas, "Influence of tension and release in piped conveyor belt on change of normal contact forces in hexagonal idler housing for pipe conveyor loaded with material," *Measurement*, vol. 84, 2016.
- [68] G. Fedorko and V. Ivanco, "Analysis of Force Ratios in Conveyor Belt of Classic Belt Conveyor," *Procedia Eng.*, vol. 48, pp. 123–128, 2012.
- [69] W. Chen and X. Li, "Model predictive control based on reduced order models applied to belt conveyor system.," *ISA Trans.*, vol. 65, pp. 350–360, Nov. 2016.
- [70] C. Yang, B. Chen, L. Bu, L. Zhou, and L. Ma, "Low-order dynamical model and distributed coordinated model predictive control for multi-stage belt conveyor systems," *J. Process Control*, 2023.
- [71] "<https://kafka.apache.org/>," <https://kafka.apache.org/> . .

- [72] <https://www.elastic.co/elasticsearch>. .
- [73] <https://www.elastic.co/kibana>. .
- [74] <https://elasticsearch-dsl.readthedocs.io/en/latest/>. .
- [75] "DIN 22101:2011-12 Continuous conveyors – Belt conveyors for loose bulk materials – Basis for calculation and dimensioning," 2011.
- [76] B. B. Grimmer, K. J., "Auslegung und Betrieb kurvengängiger Förderbänder mit normalen Fördergurten," *Fördern und Heb.*, vol. 22, no. 4, 1972.
- [77] F. Kessler, "Untersuchung der Führungskräfte quer zur Gurtlaufriichtung bei Gurtförderern mit Horizontalkurven," Dissertation Montanuniversität Leoben, 1986.
- [78] K. Grabner, "Untersuchungen zum Normalkraftverlauf zwischen Gurt und Tragrollen," Dissertation Montanuniversität Leoben, 1990.
- [79] A. Hintz, *Einfluss des Gurtaufbaus auf den Energieverbrauch von Gurtförderanlagen*. Universität Hannover, 1993.
- [80] L. (Hrsg. . Wennekamp, T.; Overmeyer, "Tribologische und rheologische Eigenschaften von Fördergurten," Dissertation Leibniz Universität Hannover, 2008.
- [81] Hans-Peter Barbey, "Untersuchungen an Tragrollen bei tiefen Temperaturen und hohen Lasten," Dissertation Universität Hannover, 1987.
- [82] *DIN 22123:2012-10 Conveyor belts - Indentation rolling resistances of conveyor belts related to beltwidth - Requirements, testing*. .
- [83] *DIN 22122 Continous mechanical handling equipment - Troughability of conveyor belts - Determination of that portion of width of conveyor belting in contact with idlers; Requirements, testing*. 2003.
- [84] *DIN EN ISO 703: Fördergurte – Biegsamkeit in Querrichtung (Muldungsfähigkeit) – Prüfverfahren (2008)*, Mär., Beuth Verl., Berlin. .
- [85] *DIN 22101 Belt conveyors for loose bulk materials*. .
- [86] "Mikroserwisj – Wikipedia, wolna encyklopedia," <https://pl.wikipedia.org/wiki/Mikroserwisj>. .
- [87] "Oprogramowanie jako usługa – Wikipedia, wolna encyklopedia," https://pl.wikipedia.org/wiki/Oprogramowanie_jako_us%C5%82uga. .
- [88] X. Hu and M. Zong, "Fault Prediction Method of Belt Conveyor Based on Grey Least Square Support Vector Machine," *2021 13th Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom.*, pp. 55–58, 2021.
- [89] P. Rumin, J. Kotowicz, D. Hogg, and A. Zastawna-Rumin, "Utilization of measurements, machine learning, and analytical calculation for preventing belt flip over on conveyor belts," *Measurement*, vol. 218, p. 113157, 2023.
- [90] Y. Yao and B. Zhang, "Influence of the elastic modulus of a conveyor belt on the power allocation of multi-drive conveyors," *PLoS One*, vol. 15, no. 7 July, pp. 1–16, 2020.
- [91] G. Lodwijkstra, "Two Decades Dynamics of Belt Conveyor Systems," *Bulk Solids Handl.*, vol. 22, no. 2, pp. 124–132, 2007.
- [92] P. Rumin, J. Kotowicz, and A. Zastawna-Rumin, "Predictive maintenance of belt conveyor idlers based on measurements, analytical calculations and decision-making algorithms," *Meas. (w trakcie recenzji)*.

[93] *ISO 281:2007 Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life. .*

Spis rysunków

Rysunek 1.1 Obszary pracy badanych osób.	7
Rysunek 1.2 Jak istotne jest monitorowanie taśmy transmisyjnego.....	7
Rysunek 1.3 Potencjalne zyski z wykrywania awarii taśmy na wczesnym etapie.	8
Rysunek 1.4 Jak istotne jest monitorowanie krążników.	8
Rysunek 1.5 Jaki wpływ na działanie przenośnika ma awaria krążniki.	9
Rysunek 1.6 Potencjalne zyski z wykrywania awarii krążniki na wczesnym etapie.....	9
Rysunek 1.7 Jak istotne jest monitorowanie napędu.....	10
Rysunek 1.8 Potencjalne zyski z wykrywania awarii napędu na wczesnym etapie.....	10
Rysunek 1.9 Budowa taśmy z linami stalowymi [8]	11
Rysunek 3.1 Geometria trasy taśmociągu.....	23
Rysunek 3.2 Rozmieszczenie silników i kół pasowych na początku przenośnika	24
Rysunek 3.3 Rozmieszczenie silników i kół pasowych na początku przenośnika	24
Rysunek 3.4 Schematyczny opis badanego przenośnika	25
Rysunek 3.5 Widok fragmentu badanego przenośnika [rr1]	25
Rysunek 4.1 Schemat systemu zbierania danych.	27
Rysunek 4.2 Schemat działania kolejki Apache Kafka	29
Rysunek 4.3 Przykładowy raporty wygenerowany przez narzędzie Kibana dla naprężenia wstępnego taśmy.	31
Rysunek 4.4 Przykładowy raport wygenerowany przez narzędzie Kibana dla przesunięcia taśmy w badanym punkcie.	31
Rysunek 5.1 Proces tworzenia instalacji i cyfrowego bliźniak przenośnika.....	32
Rysunek 5.2 Budowanie modelu przenośnika.....	33
Rysunek 5.3 Budowanie modelu przenośnika – geometria.	34
Rysunek 5.4 Budowanie modelu przenośnika - parametry.....	34
Rysunek 5.5 Wizualizacja modelu przenośnika widok pojedynczego mostu oraz widok stacji rozładowania.....	35
Rysunek 6.1 Schemat do analizowania oporu toczenia taśmy po krążniku [64].	41
Rysunek 6.2 Ilustracja kątów obrotu statywu krążników [64].	44
Rysunek 6.3 Procedura naprężenia taśmy oraz przesunięcia taśmy na łukach.....	48
Rysunek 6.4 Naprężenia na badanym przenośniku pracującym z obciążeniem.....	49
Rysunek 6.5 Naprężenia na badanym przenośniku pracującym bez obciążenia.....	49
Rysunek 7.1 Schemat działania metody gradientu [m1][m2].	52
Rysunek 7.2 Procedura dopasowani w oparciu o pomiary przesunięcia taśmy.	54
Rysunek 7.3 Procedura dopasowania w oparciu o pomiary bębna napinającego i mocy silników.....	55
Rysunek 8.1 Schemat architektury systemu.....	57
Rysunek 9.1 Elementy składowe cyfrowego bliźniaka.....	59
Rysunek 9.2 Przepływy informacji od instalacji do cyfrowego bliźniaka.....	60
Rysunek 9.3 Przepływy od cyfrowego bliźniaka do instalacji.....	61
Rysunek 10.1 Opis algorytmu SVR [26].	64
Rysunek 10.2 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 61 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy.	67
Rysunek 10.3 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 61 równych sekcji.....	68
Rysunek 10.4 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 14 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy.	68
Rysunek 10.5 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 14 równych sekcji.....	69
Rysunek 10.6 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 14 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy oraz 14 równych sekcji.	69
Rysunek 10.7 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 3 sekcji utworzonych na podstawie geometrii trasy.	70

Rysunek 10.8 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 3 równych sekcji.....	70
Rysunek 10.9 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 17 zmiennych niezależnych (dla sekcji geometrycznych) wyodrębnionych z użyciem algorytmu PCA.....	71
Rysunek 10.10 Porównanie rzeczywistych pomiarów i szacunków uzyskanych na podstawie 17 zmiennych niezależnych (dla równych sekcji) wyodrębnionych z użyciem algorytmu PCA.	71
Rysunek 10.11 Obrót taśmy – (A) przed awarią, (B) w trakcie awarii, (C) po awarii.	76
Rysunek 10.12 Porównanie mocy napędu przenośnika w przykładowych przypadkach.....	76
Rysunek 10.13 Algorytm przewidywania obrotu taśmy.....	78
Rysunek 10.14 Porównanie oporów ruchu przenośników taśmowych dla dwóch instalacji przenośników taśmowych długich o identycznej konstrukcji, różniących się nachyleniem [85].	79
Rysunek 10.15 Wbudowany algorytm podejmowania decyzji.....	81
Rysunek 10.16 Porównanie wzrostu naprężenia na sekcji w sytuacji wystąpienia awarii. ...	82
Rysunek 10.17 Naprężenia sekcji na górnym i dolnym pasie.	83
Rysunek 10.18 Algorytm przewidywania przesunięcia taśmy.....	86
Rysunek 10.19 Algorytm podejmowania decyzji odnośnie do przesunięcia taśmy.	87
Rysunek 10.20 Rozkład najważniejszych sił oddziałujących na krążniki umieszczone na statywie.....	91
Rysunek 10.21 Rozkład sił działających na łożyska w ramach danej krążniki.	93
Rysunek 10.22 Procedura wyznaczania grup krążników.....	96
Rysunek 10.23 Algorytm podejmowania decyzji podczas inspekcji taśmociągu.	99
Rysunek 10.24 Sumaryczna liczba wymienionych krążników w przypadku braku znajomości dystrybucji awarii.....	102
Rysunek 10.25 Sumaryczna liczba wymienionych krążników w przypadku znajomości dystrybucji awarii.....	103
Rysunek 10.26 Sumaryczna liczba wymienionych krążników dla różnych położeń badanych krążników.....	104
Rysunek 10.27 Względna akceptowalna różnica względem stanu normalnej pracy.....	105
Rysunek 10.28 Przewidywana okres, w którym nastąpi awaria 3% krążników.	106
Rysunek 10.29 Zmiany współczynnika α rozkładu Weibull.....	107
Rysunek 10.30 Zmiany współczynnika β rozkładu Weibull.....	107

Spis tablic

Tabela 3.1 Sekcje badanego przenośnika.....	23
Tabela 3.2 Główne parametry przenośnika	26
Tabela 6.1 Opory pracy przenośnika w pełni obciążonego.....	50
Tabela 6.2 Opory pracy przenośnika pracującego bez obciążenia.....	50
Tabela 10.1 Jakość szacowania dla (a) redukcji metodą PCA, oraz (b) redukcji na podstawie geometrii trasy.	72
Tabela 10.2 Geometria badanego taśmociągu.....	88
Tabela 10.3 Rezultaty dla prędkości transportowej 3m/s i prędkości podawania 1250t/h. ...	88
Tabela 10.4 Rezultaty dla prędkości transportowej 5m/s i prędkości podawania 1250t/h. ...	89
Tabela 10.5 Rezultaty dla prędkości transportowej 5m/s i prędkości podawania 2000t/h. ...	89
Tabela 10.6 Rezultaty dla prędkości transportowej 5m/s i wypełnionymi materiałem sekcjami nr 1,2 i 3.....	90
Tabela 10.7 Parametry pracy przenośnika.	100
Tabela 10.8 Siły oddziaływujące na łożyska w krążnik oraz L10h w nominalnych parametrach pracy przenośnika.....	101

Załączniki

Załącznik 1

Obliczeniowe naprężenia na badanym przenośniku przy pracy pod obciążeniem

Numer sekcji	Typ sekcji	Pozycja	Przenośnik pełny		
			Praca ciągła	Start	Stop
		[m]	[kN]		
1	US	495,5	79,71	70,45	170,86
2	US	504,6	80,06	70,82	171,05
3	US	846,1	87,39	78,79	172,03
4	US	1846,1	104,21	97,6	168,97
5	US	2065,8	108,03	101,86	168,43
6	US	2117,3	113,07	106,99	172,43
7	US	2281,1	128,52	122,77	184,63
8	US	2302,3	130,97	125,27	186,66
9	US	2359,1	132,76	127,17	187,32
10	US	2504	154,07	148,76	205,74
11	US	2534,1	163,51	158,27	214,58
12	US	2680,9	166,77	161,82	214,92
13	US	2731	156,4	151,55	203,54
14	US	2925,7	145,04	140,58	188,31
15	US	3006,2	140,99	136,69	182,65
16	US	3123,1	132,58	128,51	171,92
17	US	3283,3	137,62	133,87	173,77
18	US	4112,5	159,46	157,25	180,2
19	US	4396,9	220,53	218,85	235,95
20	US	4623,2	223,15	221,9	234,37
21	US	4753,2	192,04	191,03	200,81
22	US	4897,9	177,48	176,76	183,36
23	US	4945,7	178,94	178,31	183,87
24	US	5203,3	233,82	233,7	233,6
25	US	5384,8	300,38	300,63	296,48
26	US	5570,27	328,61	329,23	321,01
27	US	5620,27	314,54	315,26	306,01
28	US	5731,67	296,33	297,26	285,71
29	US	5788,17	290,77	291,8	279,1
30	US	5904,37	257,96	259,21	244,09
31	US	6141,07	215,39	217,08	197,09
32	US	6186,07	213,25	215,03	194,05
33	US	6347,47	218	220,11	195,6
34	US	6640,37	280,3	282,99	252,04
35	US	6852,07	373,08	376,21	340,49

36	US	6897,07	393,07	396,29	359,56
37	US	7212,57	415,47	419,32	375,69
38	US	7501,47	331,61	336,04	285,99
39	US	7671,77	301,9	306,67	252,87
40	US	7884,17	290,89	296,08	237,63
41	US	7980,37	288,29	293,67	233,11
42	US	8279,67	377,52	383,51	316,32
43	US	8549,57	429,1	435,62	362,51
44	US	8689,87	414,25	421,05	344,86
45	US	8729,87	408,8	415,68	338,62
46	US	8901,77	367,64	374,87	294
47	US	8944,65	358,5	365,81	283,99
48	US	9194,65	312,74	320,56	233,23
49	US	9456,95	310,9	319,24	226,18
50	US	9546,35	327,03	335,55	240,52
51	US	9804,25	294,63	303,66	202,96
52	US	9843,25	280,45	289,56	187,99
53	US	9982,25	216,12	225,52	120,79
54	US	10341,25	196,08	206,19	93,6
55	US	10648,25	193,26	203,95	85,08
56	US	11074,75	180,51	192,04	63,84
57	US	11112,45	178,19	189,79	60,77
58	US	11306,45	184,02	196,01	62,74
59	US	12093,45	202,97	216,43	67,07
60	US	12311,25	224,88	238,74	84,93
61	US	12395,95	243,85	257,87	102,31
62	Head/Drive	12395,95	102,55	102,31	102,31
63	Return	12395,95	102,55	102,31	102,31
64	TakeUp	12395,95	102,31	102,31	102,31
65	Return	12395,95	102,31	102,31	102,31
66	LS	12311,25	100,16	100,19	99,89
67	LS	12093,45	98,41	98,51	97,44
68	LS	11306,45	101,51	101,86	98,02
69	LS	11112,45	102,89	103,3	98,75
70	LS	11074,75	103,62	104,05	99,36
71	LS	10648,25	110,38	110,95	104,7
72	LS	10341,25	113,07	113,74	106,41
73	LS	9982,25	120,1	120,89	112,24
74	LS	9843,25	130,85	131,68	122,5
75	LS	9804,25	133,37	134,22	124,89
76	LS	9546,35	141,81	142,75	132,47
77	LS	9456,95	140,46	141,42	130,82
78	LS	9194,65	143,16	144,21	132,64

79	LS	8944,65	152,62	153,76	141,26
80	LS	8901,77	154,35	155,5	142,85
81	LS	8729,87	162,29	163,5	150,21
82	LS	8689,87	163,7	164,92	151,48
83	LS	8549,57	167,42	168,69	154,73
84	LS	8279,67	163,93	165,29	150,34
85	LS	7980,37	153,6	155,06	139
86	LS	7884,17	154,88	156,37	139,96
87	LS	7671,77	158,86	160,42	143,23
88	LS	7501,47	164,74	166,36	148,54
89	LS	7212,57	180,2	181,91	163,01
90	LS	6897,07	181,7	183,52	163,46
91	LS	6852,07	179,29	181,13	160,9
92	LS	6640,37	168,13	170,04	149,01
93	LS	6347,47	161,71	163,72	141,62
94	LS	6186,07	162,85	164,91	142,22
95	LS	6141,07	163,6	165,68	142,81
96	LS	5904,37	171,17	173,32	149,62
97	LS	5788,17	177,08	179,27	155,15
98	LS	5731,67	178,28	180,49	156,18
99	LS	5620,27	181,54	183,79	159,08
100	LS	5570,27	184,08	186,34	161,45
101	LS	5384,8	182,74	185,06	159,49
102	LS	5203,3	175,07	177,46	151,21
103	LS	4945,7	169,44	171,92	144,71
104	LS	4897,9	169,78	172,27	144,89
105	LS	4753,2	173,26	175,8	147,89
106	LS	4623,2	178,56	181,13	152,76
107	LS	4396,9	180,63	183,28	154,11
108	LS	4112,5	173,39	176,14	145,96
109	LS	3283,3	176,52	179,53	146,44
110	LS	3123,1	177,7	180,76	147,08
111	LS	3006,2	180,14	183,24	149,13
112	LS	2925,7	182,07	185,2	150,79
113	LS	2731	185,72	188,91	153,79
114	LS	2680,9	187,83	191,04	155,73
115	LS	2534,1	189,81	193,07	157,22
116	LS	2504	188,81	192,07	156,12
117	LS	2359,1	187,22	190,54	154,05
118	LS	2302,3	187,64	190,97	154,27
119	LS	2281,1	187,67	191,01	154,24
120	LS	2117,3	187,38	190,78	153,4
121	LS	2065,8	187,22	190,63	153,06

122	LS	1846,1	189,34	192,83	154,45
123	LS	846,1	198,77	202,59	160,55
124	LS	504,6	200,67	204,6	161,36
125	LS	495,5	200,73	204,67	161,39
126	LS	0	202,6	206,69	161,67
127	Tail/Drive	0	61,3	51,13	161,67

Załącznik 2

Obliczeniowe naprężenia na badanym przenośniku przy pracy bez obciążenia

Numer sekcji	Typ sekcji	Pozycja [m]	Przenośnik pusty		
			Praca ciągła	Start	Stop
			[kN]		
1	US	495,5	119,67	119,13	129,14
2	US	504,6	119,73	119,19	129,14
3	US	846,1	120,86	120,44	128,09
4	US	1846,1	127,38	127,45	125,94
5	US	2065,8	128,89	129,07	125,54
6	US	2117,3	129,8	130	126
7	US	2281,1	132,79	133,07	127,57
8	US	2302,3	133,3	133,59	127,9
9	US	2359,1	133,82	134,14	127,93
10	US	2504	137,45	137,84	130,3
11	US	2534,1	138,98	139,38	131,56
12	US	2680,9	140,52	141	131,83
13	US	2731	139,25	139,75	130,12
14	US	2925,7	138,29	138,89	127,47
15	US	3006,2	138,28	138,92	126,76
16	US	3123,1	137,47	138,16	124,93
17	US	3283,3	138,94	139,72	125,02
18	US	4112,5	143,17	144,24	123,96
19	US	4396,9	152,35	153,52	131,31
20	US	4623,2	153,49	154,74	131
21	US	4753,2	149,08	150,38	125,76
22	US	4897,9	147,45	148,82	122,87
23	US	4945,7	147,88	149,28	122,89
24	US	5203,3	156,8	158,32	129,55
25	US	5384,8	167,39	169	138,54
26	US	5570,27	172,77	174,47	142,31
27	US	5620,27	170,88	172,6	140,09
28	US	5731,67	168,37	170,13	136,87
29	US	5788,17	167,67	169,45	135,81
30	US	5904,37	163,24	165,06	130,62
31	US	6141,07	157,29	159,19	123,15
32	US	6186,07	157,14	159,07	122,62
33	US	6347,47	158,6	160,6	122,67
34	US	6640,37	168,77	170,92	130,29
35	US	6852,07	183,37	185,63	143
36	US	6897,07	186,52	188,8	145,75
37	US	7212,57	192,01	194,45	148,5

38	US	7501,47	181,25	183,83	135,19
39	US	7671,77	177,59	180,25	130,05
40	US	7884,17	177,04	179,81	127,65
41	US	7980,37	177,04	179,85	126,81
42	US	8279,67	191,2	194,16	138,35
43	US	8549,57	200,66	203,75	145,45
44	US	8689,87	199,19	202,35	142,77
45	US	8729,87	198,69	201,87	141,92
46	US	8901,77	193,57	196,83	135,29
47	US	8944,65	192,41	195,7	133,75
48	US	9194,65	187	190,41	126,15
49	US	9456,95	187,76	191,29	124,64
50	US	9546,35	190,56	194,14	126,66
51	US	9804,25	187,68	191,39	121,54
52	US	9843,25	185,81	189,54	119,32
53	US	9982,25	176,96	180,76	109,22
54	US	10341,25	175,76	179,73	104,89
55	US	10648,25	175,83	179,91	103
56	US	11074,75	175,94	180,23	99,42
57	US	11112,45	175,73	180,04	98,88
58	US	11306,45	177,48	181,88	98,94
59	US	12093,45	181,46	186,15	97,91
60	US	12311,25	184,88	189,64	99,93
61	US	12395,95	187,8	192,59	102,31
62	Head/Drive	12395,95	102,33	102,31	102,31
63	Return	12395,95	102,33	102,31	102,31
64	TakeUp	12395,95	102,31	102,31	102,31
65	Return	12395,95	102,31	102,31	102,31
66	LS	12311,25	100,16	100,19	99,68
67	LS	12093,45	98,41	98,51	96,68
68	LS	11306,45	101,51	101,86	95,3
69	LS	11112,45	102,89	103,3	95,53
70	LS	11074,75	103,62	104,05	96,04
71	LS	10648,25	110,38	110,95	100,26
72	LS	10341,25	113,07	113,74	101,21
73	LS	9982,25	120,1	120,89	106,1
74	LS	9843,25	130,85	131,68	115,99
75	LS	9804,25	133,37	134,22	118,28
76	LS	9546,35	141,81	142,75	125,18
77	LS	9456,95	140,46	141,42	123,3
78	LS	9194,65	143,16	144,21	124,44
79	LS	8944,65	152,62	153,76	132,41
80	LS	8901,77	154,35	155,5	133,88

81	LS	8729,87	162,29	163,5	140,79
82	LS	8689,87	163,7	164,92	141,96
83	LS	8549,57	167,42	168,69	144,84
84	LS	8279,67	163,93	165,29	139,75
85	LS	7980,37	153,6	155,06	127,62
86	LS	7884,17	154,88	156,37	128,32
87	LS	7671,77	158,86	160,42	131,04
88	LS	7501,47	164,74	166,36	135,91
89	LS	7212,57	180,2	181,91	149,61
90	LS	6897,07	181,7	183,52	149,24
91	LS	6852,07	179,29	181,13	146,56
92	LS	6640,37	168,13	170,04	134,11
93	LS	6347,47	161,71	163,72	125,94
94	LS	6186,07	162,85	164,91	126,12
95	LS	6141,07	163,6	165,68	126,6
96	LS	5904,37	171,17	173,32	132,81
97	LS	5788,17	177,08	179,27	138,05
98	LS	5731,67	178,28	180,49	138,94
99	LS	5620,27	181,54	183,79	141,56
100	LS	5570,27	184,08	186,34	143,8
101	LS	5384,8	182,74	185,06	141,36
102	LS	5203,3	175,07	177,46	132,6
103	LS	4945,7	169,44	171,92	125,43
104	LS	4897,9	169,78	172,27	125,48
105	LS	4753,2	173,26	175,8	128,1
106	LS	4623,2	178,56	181,13	132,65
107	LS	4396,9	180,63	183,28	133,43
108	LS	4112,5	173,39	176,14	124,57
109	LS	3283,3	176,52	179,53	122,98
110	LS	3123,1	177,7	180,76	123,2
111	LS	3006,2	180,14	183,24	124,94
112	LS	2925,7	182,07	185,2	126,4
113	LS	2731	185,72	188,91	128,89
114	LS	2680,9	187,83	191,04	130,7
115	LS	2534,1	189,81	193,07	131,81
116	LS	2504	188,81	192,07	130,62
117	LS	2359,1	187,22	190,54	128,18
118	LS	2302,3	187,64	190,97	128,26
119	LS	2281,1	187,67	191,01	128,16
120	LS	2117,3	187,38	190,78	126,91
121	LS	2065,8	187,22	190,63	126,43
122	LS	1846,1	189,34	192,83	127,25
123	LS	846,1	198,77	202,59	130,74

124	LS	504,6	200,67	204,6	130,7
125	LS	495,5	200,73	204,67	130,71
126	LS	0	202,6	206,69	129,75
127	Tail/Drive	0	117,13	116,41	129,75

Załącznik 3 – Dostępne dane pomiarowe z badanego przenośnika

Sygnały PLC z przenośnika			
Nazwa	Typ danych	Opis	Jednostka
bStandstill	Bool	Motors standstill	-
bStartup_Completed	Bool	Startup completed	-
bRunning_Auto_SP	Bool	OLC runs in automatic mode at target speed	-
bPMI	Bool	Discharge enabled (Previous Machine Interface)	-
bEnable_Feeding	Bool	Material feed enabled	-
rPower_Total	Real	Total power	kW
rPower_Head	Real	Power head	kW
rPower_Tail	Real	Power tail	kW
rSpeed	Real	Speed	mps
rSpeed_Head	Real	Head speed	mps
rSpeed_Tail	Real	Tail speed	mps
rTRQ	Real	Torque	kNm
rTRQ_Head	Real	Head torque	kNm
rTRQ_Tail	Real	Tail torque	kNm
rSpeed_Max	Real	Maximum belt speed	mps
rTRQ_Max	Real	Maximum torque	kNm
iFilllevel_Discharge	Int	Discharge filling level	%
iSQ_Master	Int	current step: Master step chain	-
iSQ_OLC	Int	current step: OLC step chain	-
Load			
bLoad_On_Belt	Bool	Material on conveyor	-
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rFeedingrate	Real	Loading rate	tph
rBelt_Load	Real	Belt loading	t
rTootalizer_Scale	Real	Material counter from belt scale	t
arLoad_Section	Array[0..11] of Real	Load sections PC2B	t
arLoad_Section[0]	Real	Load section PC2B 1	t
arLoad_Section[1]	Real	Load section PC2B 2	t
arLoad_Section[2]	Real	Load section PC2B 3	t
arLoad_Section[3]	Real	Load section PC2B 4	t
arLoad_Section[4]	Real	Load section PC2B 5	t
arLoad_Section[5]	Real	Load section PC2B 6	t
arLoad_Section[6]	Real	Load section PC2B 7	t
arLoad_Section[7]	Real	Load section PC2B 8	t
arLoad_Section[8]	Real	Load section PC2B 9	t
arLoad_Section[9]	Real	Load section PC2B 10	t
arLoad_Section[10]	Real	Load section PC2B 11	t
arLoad_Section[11]	Real	Load section PC2B 12	t
DRV1			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm

rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm
rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh
rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C
rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C
rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
DRV2			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm
rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh
rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C
rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C

rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
DRV3			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm
rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh
rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C
rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C
rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
DRV4			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm
rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh
rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C

rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C
rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
DRV5			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm
rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh
rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C
rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C
rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
DRV6			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm
rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh

rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C
rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C
rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
DRV7			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm
rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh
rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C
rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C
rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
DRV8			
rRPM	Real	Rotational speed	rpm
rSpeed	Real	Belt speed	mps
rSpeed_Norm	Real	Belt speed	%
rSpeed_ref	Real	Belt speed at nominal speed	mps
rTrq_Motor	Real	Torque motor	Nm
rTrq_Motor_Norm	Real	Torque motor	%
rTrq_Gearbox	Real	Torque gear output	kNm

rTrq_Gearbox_Norm	Real	Torque gear output	%
rCurrent	Real	Active current	A
rPower	Real	Active power	kW
wFlt_code	Word	Error code from inverter	-
rEnergy_CNT	Real	Energy counter in inverter	MWh
rTemp_u1	Real	Temperature 01 (winding U1)	°C
rTemp_u2	Real	Temperature 02 (winding U2)	°C
rTemp_v1	Real	Temperature 03 (winding V1)	°C
rTemp_v2	Real	Temperature 04 (winding V2)	°C
rTemp_w1	Real	Temperature 05 (winding W1)	°C
rTemp_w2	Real	Temperature 06 (winding W2)	°C
rTemp_de1	Real	Temperature 07 (bearing drive side 1)	°C
rTemp_de2	Real	Temperature 08 (bearing drive side 2)	°C
rTemp_nde1	Real	Temperature 09 (bearing non-drive side 1)	°C
rTemp_nde2	Real	Temperature 10 (bearing non-drive side 2) other	°C
rTemp_Gearbox	Real	Temperature 11 Gear oil	°C
Brake1			
Brake_Counter	DInt	Number of braking operations	-
Brake2		-	-
Brake_Counter	DInt	Number of braking operations	-
Tension_System			
F_Act	Real	Current belt tension	kN
F_Soll	Real	Target belt tension	kN
F_Tol_Pos	Real	Maximum tolerance window	kN
F_Tol_Neg	Real	Minimum tolerance window	kN
Tension_Way_Max	Bool	Max. Tensioning path reached	-
Tension_Way_Min	Bool	Min. tensioning travel reached	-
Winch Tensioning	Bool	Winch is tensioning	-
Winch_Releasing	Bool	Winch is releasing	-
rTemp_Env	Real	Environment temperature	°C
7. Performance data (DB3013)			
diOperation_Hours	DInt	Operating hours	h
iOperation_Minutes	Int	Operating minutes	min
rMaterial_Totalizer	Real	Material counter total	kt
rMaterial_Daily	Real	Material counter day	t
rEnergy_Totalizer	Real	Energy meter total	MWh
8. Machine parameter (DB3014)			
tiEmptying_Time	Time	Time Idle	-
rSpeed_Auto	Real	Speed Auto	mps
rSpeed_Manual	Real	Speed manual	mps
tiDelay_Full	Time	Delay time full message	-
tiDelay_Empty	Time	Delay time empty message	-

tiSW_Optical_Ext	Time	Extension of optical start-up warning	-
tiSW_Acoustical_Ext	Time	Extension of acoustic start warning	-

Streszczenie

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zaproponowanie mechanizmów wspomagających utrzymanie przenośników taśmowych o znacznych rozmiarach, które są wykorzystywane do transportu materiałów sypkich na duże odległości, w szczególności dotyczy to przemysłu energetycznego, wydobywczego i centowego. Praca ma na celu zidentyfikowanie i opracowanie rozwiązań, które zwiększą efektywność oraz niezawodność badanych urządzeń, a także zminimalizują ryzyko awarii, które mogą prowadzić do kosztownych przestojów.

W ramach pracy przeprowadzono szeroko zakrojone studia literaturowe, które pozwoliły na dogłębne zrozumienie obecnego stanu wiedzy i technologii w obszarze przenośników taśmowych. Analiza ta obejmowała zarówno badania potrzeb rynku, jak i szczegółową ocenę dostępnych na rynku rozwiązań. Na podstawie wspomnianej analizy zidentyfikowano monitoring zachowania taśmy oraz rolek znajdujących się wzdłuż trasy przenośnika jako kluczowe obszary wymagający poprawy. Największy nacisk położono na możliwość przewidywania awarii, co jest kluczowe dla uniknięcia przestojów i zapewnienia ciągłości operacji.

Niniejsza praca wpisuje się w ideę Przemysłu 4.0, która zakłada integrację nowoczesnych technologii cyfrowych w procesach przemysłowych. Praca wykorzystuje techniki uczenia maszynowego, Internet Rzeczy, zaawansowane algorytmy analityczne i mechanizmy podejmowania decyzji.

W ramach badań opracowano autorski model przenośnika taśmowego oraz innowacyjne narzędzia typu CAD, służące do tworzenia modeli i projektowania przenośników. Stworzono również autorskie narzędzia umożliwiające parametryzację modeli oraz wykonywanie obliczeń analitycznych, służących do wyznaczania sił, oporów oraz naprężeń występujących na przenośniku. Obliczenia bazują na literaturze naukowej, badaniach oraz wiedzy i doświadczeniu firmy BEUMER odnośnie zachowania się poszczególnych elementów przenośnika.

Badania i symulacje zaprezentowane w pracy przeprowadzono w oparciu o istniejącą instalację przenośnika taśmowego. Badany przenośnik zlokalizowany jest w prowincji Syczuan w Chinach. Posiada całkowitą długość 12461 metrów oraz pozwala na transport 2400 ton wapienia w ciągu godziny. Ze względu na lokalizację w terenie górzystym przenośnik posiada skomplikowaną geometrię zawierającą liczne wzniesienia i zakręty. Takie cechy czynią go doskonałym obiektem testowym.

Praca ta obejmuje również rozwój metod i narzędzi służących do dopasowywania stworzonych modeli do rzeczywistych instalacji przenośników taśmowych. W celu precyzyjnego dopasowania modelu zastosowano techniki związane z uczeniem maszynowym. Dodatkowo, zaproponowano zestawienie metod zbierania i przetwarzania danych wraz z opracowanymi narzędziami w celu implementacji koncepcji cyfrowego bliźniaka, który będzie

umożliwiać dokładne monitorowanie i analizowanie pracy przenośnika w czasie rzeczywistym.

W ramach rozprawy zaproponowano także metody rozwiązania rzeczywistych problemów, które mogą występować podczas pracy przenośnika. Wszystkie proponowane metody są ukierunkowane na przewidywanie ryzyka przyszłych awarii, a nie tylko na wykrywanie ich wystąpienia. Wykrywanie zdarzeń jest zwykle realizowane przez zainstalowane na przenośniku czujniki i nie jest to obszarem pacy. Na podstawie obliczeń analitycznych, uczenia maszynowego i pomiarów, w pierwszej kolejności zaproponowano metodę wykrywania ryzyka obrotu pasa. Następnie, opracowano metodę wykrywania zbyt dużego poślizgu pasa, również bazującą na analogicznych metodach przetwarzaniu danych. Jako ostatnią metodę zaproponowano innowacyjne rozwinięcie metody, detekcji krążników wymagających wymiany, zaproponowanej w literaturze naukowej, a nie możliwej do implementacji ze względu na jej ograniczenia.

Analizy i badania potwierdziły postawioną tezę, iż możliwe jest stworzenie w oparciu o pomiary, techniki uczenia maszynowego oraz obliczenia analityczne narzędzi wspomagających utrzymanie przenośników taśmowych.

Abstract

The objective of this doctoral dissertation is to propose mechanisms that support the maintenance of large belt conveyors used for transporting bulk materials over long distances. This work aims to identify and develop solutions that enhance the efficiency and reliability of the conveyors while minimizing the risk of failures that could lead to costly downtime.

Extensive literature reviews were conducted to gain a comprehensive understanding of the current state of knowledge and technology in the field of belt conveyors. This analysis included market needs assessment and a detailed evaluation of available solutions. Based on this analysis, monitoring the behavior of the belt and rollers along the conveyor route was identified as a critical area needing improvement. The primary focus was placed on the ability to predict failures, which is crucial for avoiding downtimes and ensuring operational continuity.

This work aligns with the Industry 4.0 concept, which involves integrating modern digital technologies into industrial processes. The research utilizes machine learning techniques, the Internet of Things (IoT), advanced analytical algorithms, and decision-making mechanisms.

As part of the research, an original model of the belt conveyor was developed along with innovative CAD tools for creating and designing conveyor models. Proprietary tools were also created to parameterize the models and perform analytical calculations to determine the forces, resistances, and stresses occurring on the conveyor. These calculations are based on scientific literature, research, and the knowledge and experience of BEUMER in understanding the behavior of individual conveyor components.

The research and simulations presented in this work were conducted on an existing belt conveyor installation located in China. This conveyor has a total length of 12,461 meters and allows for the transport of 2,400 tons of limestone per hour. Due to its location in mountainous terrain, the conveyor has a complex geometry with numerous elevations and curves, making it an ideal test object.

This dissertation also includes the development of methods and tools for adapting the created models to real conveyor installations. To accurately fit the model, machine learning techniques were employed. Additionally, a combination of data collection and processing methods was proposed along with developed tools to implement the concept of a digital twin, enabling precise monitoring and analysis of conveyor operation in real time.

Furthermore, the dissertation proposes methods for addressing real-world problems that may arise during conveyor operation. All proposed methods are aimed at predicting the risk of future failures rather than merely detecting their occurrence, as event detection is typically handled by sensors installed on the conveyor and is not the focus of this work. Based on analytical calculations, machine learning, and measurements, a method for detecting the risk of belt misalignment was proposed first. Subsequently, a method for detecting excessive

belt slippage was developed, also based on similar data processing techniques. Lastly, an innovative enhancement of a method for detecting rollers that require replacement was proposed, which was suggested in the scientific literature but could not be implemented due to its limitations.

The analyses and research confirmed the thesis that it is possible to create tools supporting the maintenance of belt conveyors based on measurements, machine learning techniques, and analytical calculations.