

Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego

WYDZIAŁ MECHANICZNY

mgr inż. Damian Bzinkowski

**OCENA MOŻLIWOŚCI IDENTYFIKACJI STANU
TAŚMY PRZENOŚNIKA ZA POMOCĄ TENSOMETRYCZNEGO
SYSTEMU POMIAROWEGO**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:
dr hab. inż. Mirosław Rucki, prof. URad.

Radom 2024

*Wątpliwość jest ojcem wynalazku
(Galileusz)*

*Pragnę podziękować wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania tej dysertacji.
Dziękuję moim rodzicom za wsparcie, jakie uzyskałem w trakcie studiów doktoranckich
na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Radomskiego im. Kazimierza Pułaskiego.
Dziękuję dr. inż. Tomaszowi Rybie za podzielenie się pomysłami,
inspiracje i pomoc w rozwiązywaniu problemów technicznych.
Dziękuję Pani dr hab. inż. Iwonie Komorskiej, prof. URad. za pomoc w analizie danych.
Szczególne podziękowania składam Promotorowi Panu dr. hab. inż. Mirosławowi Ruckiemu,
prof. URad. za nieocenione wsparcie naukowe i techniczne, za wspólną pracę oraz umożliwienie
realizacji niniejszej rozprawy.*

Spis treści

Streszczenie	9
Abstract	10
Spis oznaczeń	11
1. Wprowadzenie.....	15
2. Cel i zakres pracy	17
3. Analiza istniejących rozwiązań.....	19
3.1. Podział i budowa przenośników.....	19
3.1.1. Przenośnik wibracyjny.....	22
3.1.2. Przenośnik śrubowy	23
3.1.3. Przenośnik zgrzebłowy	24
3.1.4. Przenośnik kubełkowy	25
3.1.5. Przenośnik taśmowy	26
3.2. Taśmy przenośnikowe.....	28
3.2.1. Taśma przenośnikowa z rdzeniem tekstylnym	29
3.2.2. Taśma przenośnikowa z rdzeniem stalowym.....	32
3.2.3. Okładki taśm przenośnikowych	34
3.2.4. Rodzaje taśm przenośnikowych.....	37
3.3. Eksploatacja taśm przenośnikowych.....	38
3.3.1. Czynniki ekonomiczne	38
3.3.2. Bezpieczeństwo	41
3.4. Systemy do monitorowania pracy taśm przenośnikowych	44
3.4.1. Zastosowanie metod optycznych	45
3.4.2. Badanie emisji akustycznej.....	47
3.4.3. Pomiary ultradźwiękowe	49
3.4.4. System elektromagnetyczny	50
3.4.5. System diagnostyki wysokorozdzielczej	51
3.4.6. Radiograficzny system detekcji	52
3.4.7. Metody termograficzne.....	53
3.4.8. Tensometryczny system pomiarowy.....	54
4. Przedmiot i metodyka badań.....	55
4.1. Opis badanej taśmy	55
4.2. Plan eksperymentu	60
4.3. Budowa układu pomiarowego.....	64
4.3.1. Rozwój czujników tensometrycznych.....	64

4.3.2. Czujniki tensometryczne w systemie monitorującym stan taśmy przenośnikowej.....	69
4.4. Stanowisko do kalibracji.....	72
4.5. Stanowisko do badań dynamicznych.....	73
5. Wyniki badań.....	75
5.1. Kalibracja i niepewność pomiaru.....	75
5.2. Badania taśmy przenośnikowej.....	88
5.2.1. Naciąg taśmy.....	89
5.2.2. Monitorowanie taśmy obciążonej.....	95
5.2.3. Uszkodzenia taśmy.....	116
5.2.4. Wytrzymałość taśmy na zrywanie.....	166
5.3. Ocena możliwości zastosowania sztucznej inteligencji do analizy pozyskanego sygnału.....	176
5.3.1. Taśma obciążona.....	176
5.3.2. Taśma uszkodzona.....	179
6. Podsumowanie i wnioski.....	187
7. Literatura.....	189

Streszczenie

Rozprawa dotyczy monitorowania w czasie rzeczywistym pracy środków transportu bliskiego, jakimi są przenośniki taśmowe. Zaproponowano innowacyjny system pomiarowy w oparciu o liniowe tensometry oporowe, rozmieszczone na bębnie zwrotnym przenośnika. Zastosowane zostały elementy pozwalające na monitorowanie oraz ciągle zbieranie danych o procesie i ich obróbka w czasie rzeczywistym. Przeprowadzono również wstępną ocenę możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji do identyfikacji obciążenia taśmy. W dalszej perspektywie zastosowanie takiego systemu zwiększa bezpieczeństwo pracy i redukuje koszty napraw, jednocześnie prowadząc do stosowania ekologicznych rozwiązań. Wymienione cechy zaproponowanego systemu pomiarowego spełniają wysokie standardy stawiane przez założenia *Przemysł 4.0*.

Po wprowadzeniu i sformułowaniu celów, w części teoretycznej rozprawy (rozdział 3) opisano istniejące rozwiązania, ze szczególnym uwzględnieniem rodzajów stosowanych w przenośnikach taśm i ich eksploatacji, w tym czynników ekonomicznych i bezpieczeństwa. Dokonano też przeglądu literatury, dotyczącej istniejących systemów monitorujących pracę przenośników taśmowych.

W dalszej części pracy (rozdział 4) omówiono metodykę badań oraz obiekt badań. W celu realizacji części empirycznej wykonano stanowisko badawcze, umożliwiające symulację pracy taśmy przenośnikowej w warunkach laboratoryjnych. Na bębnie zwrotnym modelu przenośnika rozmieszczono trzy tensometry paskowe, na które taśma wywiera zmienny nacisk w czasie pracy. Nowatorskim rozwiązaniem jest zastosowanie tensometrów, w szczególności rozmieszczenie ich na całym obwodzie bębna, a w konsekwencji możliwość pozyskiwania sygnału ciągłego. Wyeliminowało to błędy związane z uderowym charakterem obciążenia dynamicznego w przypadku zastosowania czujników punktowych, wykryte w badaniach wstępnych. Zbudowano również dedykowane stanowisko do kalibracji tensometrów i wyznaczono ich charakterystyki metrologiczne. Wykryto zależność wskazań tensometrów od położenia kąтового bębna oraz od obciążenia, a także wyznaczono niepewność pojedynczego pomiaru $U_{0,99} = 3,6$ ADU, co stanowiło mniej niż 1% mierzonej wartości. Powtarzalność $\%EV$ systemu pomiarowego, obejmującą rozrzuty wskazań przy zmianie obciążenia, wyznaczono jako 3,8%, a przy zmianie położenia kąтового jako 5,8%.

Parametrami, podlegającymi ocenie podczas badań dynamicznych, były zmiany w przebiegu sygnałów emitowanych przez tensometry w czasie rzeczywistym w wyniku zmian prędkości posuwu taśmy, obciążenia nieruchomej oraz ruchomej taśmy, a także w wyniku wykonania uszkodzeń na taśmie. W ten sposób określono na wykresach punkty identyfikujące obciążenie $P_c = f(t)$ oraz punkty identyfikujące uszkodzenie $P_u = f(t)$. Badania wykonano w kilku etapach dla dwóch taśm, zmieniając parametry wejściowe, do analizy porównawczej otrzymano 953 wykresy. Rozdział 5 został poświęcony omówieniu wyników badań, uzupełniając analizę przebiegów wskazań systemu tensometrycznego danymi z testów na zrywanie materiału badanej taśmy. W końcowym podrozdziale dokonano wstępnej oceny możliwości zastosowania sztucznej inteligencji do analizy pozyskanego sygnału. Z pięciu badanych algorytmów dwa, sieci neuronowe Transformer (TNN) i długa pamięć krótkoterminowa (LSTM) osiągnęły trafności przewidywania $A_c = 100\%$.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie dotyczące całego zakresu wykonanych prac badawczych. Stwierdzono, że wyniki badań innowacyjnego tensometrycznego układu pomiarowego w pełni dowodzą słuszności postawionych tez naukowych. Zostały zdefiniowane możliwości i kierunki prowadzenia dalszych badań, zostały też przedstawione cechy systemu monitorowania. Stwierdzono możliwość wykorzystania systemu do monitorowania pracy przenośników taśmowych w czasie rzeczywistym i jego przydatność do realizacji przewidującej obsługi technicznej, zgodnie z założeniami koncepcji *Przemysł 4.0*.

Abstract

The dissertation is devoted to the real-time monitoring of the close transportation devices, namely, belt conveyors. It presents a novel measurement system based on the linear strain gauges placed on the tail pulley surface. These gauges enabled monitoring and continuous collection and processing of data related to the process. Also the initial assessment of the artificial intelligence application to the load identification was made. In further perspective, implementation of such a system can improve safety of the work and reduce the reparation expenses, leading to the application of the greener solutions. The abovementioned features of the innovative measurement system meet the high requirements of *Industry 4.0* concept.

After the introduction and formulation of the objectives, in Chapter 3, a review of existing solution is presented. Particular attention was paid to different types of the belts applied in the conveyors, and to the maintenance issues, including economical questions and safety. A wide range of the proposed monitoring systems is described, based on the recently published works.

In Chapter 4, research methodology and the examined object are presented. To perform experimental works, a test rig was built, making possible to simulate the work of a conveyor belt in laboratory conditions. Three strain gauges were placed on the surface of the tail pulley, so that they may sense the varying pressure of the belt during conveyor's work. Application of the linear strain gauges is an innovative solution, because they collect continuous signal around the entire circumference of the pulley. This way the dynamical errors generated by the strikes of the belt on the point strain gauges were eliminated. Additionally, a dedicated calibration set was built for the strain gauges fixed to the pulley surface, and the metrological characteristics were determined. In particular, it was found that the strain gauge indications were dependent on the angle position of the pulley and on the load. The expanded uncertainty $U_{0.99} = 3.6$ ADU was estimated, being less than 1% of the measured value. Repeatability calculated as equipment variation was $\%EV = 3.8\%$ for different loads and $\%EV = 5.8\%$ for different declination angles.

During the experimental research in dynamic conditions, the strain gauge signal was registered while the following parameters were altered: belt velocity, load on the belt, and certain damages were made in the belt. This way, the points in the registered graphs were identified related to the loads, $P_c = f(t)$, and the ones related to the damages $P_u = f(t)$. The experiments were performed in several stages for two belts with different input parameters, obtaining 953 graphs of the registered strain gauge signals.

Chapter 5 consists of discussion of the results and their comparative analysis. In addition, the tests of strength were made using the samples made out of the tested belt material. At the end of the chapter, initial analysis was made on feasibility of the artificial intelligence application for the analysis of the received signals. Among five tested algorithms, Transformer Neural Network (TNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) reached the classification accuracy $A_c = 100\%$ when identifying the load placed on the moving belt.

In Chapter 6, the summary of the performed research works and analyses is given. It was demonstrated that the results obtained from the innovative strain gauge measurement system proved the formulated scientific theses. Moreover, main advantageous characteristics of the monitoring system were described with possibilities and directions of further research. The feasibility of the system for conveyor belt real-time monitoring was confirmed, especially in terms of the *predictive maintenance*, in agreement with main concepts of *Industry 4.0*.

Spis oznaczeń

a – odległość między kubelkami [m],

A_c – trafność przewidywania [%],

E_t – moduł sprężystości wzdłużnej [MPa]

EV – powtarzalność pomiaru,

F – przekrój strumienia materiału [m²],

F_{brl} – siła wstępna [MPa],

F_m – największa siła rozciągająca [N],

F_n – siła nacisku taśmy na tensometr [N],

k – współczynnik rozszerzenia,

k_1 – współczynnik zmniejszający zależny od kąta pochylenia trasy,

k_2 – współczynnik uwzględniający nierównomierność podawanego materiału,

k_p – współczynnik pochylenia przenośnika względem poziomu,

$K(t)$ – kosztów zakupu oraz naprawy taśmy na przenośniku na jednostkę czasu

K_m – średni koszt naprawy taśmy wykonanej na przenośniku [zł],

K_p – koszt demontażu starej taśmy oraz zakupu i instalacji nowej, przy założeniu, że są one niezależne od czasu [zł],

k_w – parametr walidacji,

l – długość taśmy przenośnikowej [mm],

L_{bl} – odległość uchwytów przy pozycji startowej [mm],

L_{brl} – długość pomiarowa standardowej drogi [mm],

l_o – rozstaw tensometrów [mm],

l_{tl} – długości części pomiarowej tensometru [mm],

ŁĄCZENIE – obszar łączenia taśmy przenośnikowej,

m_{k0} – masa kalibracyjna $m_{k0} = 0$ g,

m_{k1} – masa kalibracyjna $m_{k1} = 3268$ g,

m_{k2} – masa kalibracyjna $m_{k2} = 5261$ g,

m_{k3} – masa kalibracyjna $m_{k3} = 6270$ g,

m_{k4} – masa kalibracyjna $m_{k4} = 7273$ g,

m_{k5} – masa kalibracyjna $m_{k5} = 8282$ g,

m_{k6} – masa kalibracyjna $m_{k6} = 9371$ g,
 $m_{0,5}$ – odważnik o masie 0,5 kg,
 m_{11} – odważnik o masie 1 kg,
 m_{12} – odważnik o masie 2 kg,
 m_{13} – odważnik o masie 3 kg,
 m_{15} – odważnik o masie 5 kg,
 n – liczba pomiarów,
 n_0 – testowa prędkość obrotowa bębna napędowego $n_0 = 80 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$,
 n_1 – prędkość obrotowa bębna napędowego $n_1 = 159 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$,
 n_2 – prędkość obrotowa bębna napędowego $n_2 = 318 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$,
 n_3 – prędkość obrotowa bębna napędowego $n_3 = 520 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$,
 N_c – liczba poprawnie dokonanego przewidywania [s],
 N_T – całkowita liczba wszystkich przewidywań [s],
 NTS – nominalna wytrzymałość taśmy przENOŚnikowej na rozciąganie $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$,
 P_c – wartości charakterystycznych punktów pomiarowych podczas obciążania taśmy [ADU],
 P_u – wartości charakterystycznych punktów pomiarowych uszkodzonej taśmy [ADU],
 \bar{q} – średnia arytmetyczna wyników pomiaru tensometrów [ADU],
 q_k – kolejny wynik pomiaru tensometru [ADU],
 RF – wartość odniesienia [ADU],
 R_T – rezystancja tensometru [Ω],
 $S(q_k)$ – eksperymentalne odchylenia standardowe wskazań tensometrów [ADU],
 S_p – połączone odchylenie standardowe eksperymentalne wskazań tensometrów [ADU],
 t – czas [s],
 t_0 – optymalny czasu wymiany taśmy [s],
 $T1$ – tensometr zewnętrzny nr 1,
 $T2$ – tensometr środkowy nr 2,
 $T3$ – tensometr zewnętrzny nr 3,
 T_{b1} – grubość odcinka pomiarowego [mm],
 TS – wytrzymałość taśmy przENOŚnikowej na rozciąganie $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$,
 t_t – grubość taśmy przENOŚnikowej [mm],
 t_{t1} – grubość tensometru [mm],

U – niepewność rozszerzona,

u – niepewność dla średniej z serii pomiarów,

$u(X)$ – niepewność standardowa określana przy pomocy eksperymentalnego odchylenia standardowego $s(q_k)$ wskazań tensometrów [ADU],

u_0 – użyteczna pojemność kubeczka [dm³],

UP I – uszkodzenie poprzeczne I,

UP II – uszkodzenie poprzeczne II,

UP III – uszkodzenie poprzeczne III,

UP I_{POPZR.} – uszkodzenie poprzeczne do kierunku pracy taśmy,

UW I – uszkodzenie wzdłużne I,

UW II – uszkodzenie wzdłużne II,

UW III – uszkodzenie wzdłużne III,

UW IV – uszkodzenie wzdłużne IV,

v – prędkość ruchu kubeczków $\left[\frac{m}{s}\right]$,

V – prędkość taśmy $\left[\frac{m}{s}\right]$,

V_0 – prędkość taśmy wyjściowa, $V_0 = 0,25 \frac{m}{s}$,

V_1 – prędkość taśmy w czasie badań dynamicznych, $V_1 = 0,5 \frac{m}{s}$,

V_2 – prędkość taśmy w czasie badań dynamicznych, $V_2 = 1 \frac{m}{s}$,

V_3 – prędkość taśmy w czasie badań dynamicznych, $V_3 = 1,6 \frac{m}{s}$,

V_{b1} – prędkość, przy której przeprowadzono badanie statycznego rozciągania $\left[\frac{mm}{min}\right]$,

V_{br1} – prędkość, przy której przeprowadzono badanie modułu sprystości $\left[\frac{mm}{min}\right]$,

w – szerokość taśmy przenośnikowej [mm],

W_{b1} – szerokość odcinka pomiarowego [mm],

w_{t1} – szerokość tensometru [mm],

x_{min} – wartości najmniejszego wskazania tensometru [ADU],

$\overline{x_{min}}$ – średnie wartości najmniejszych wskazań tensometru [ADU],

α – parametr rozkładu,

α_p – kąt nachylenia przenośnika [°],

β – parametr rozkładu,

γ – ciężar usypowy transportowanego materiału $\left[\frac{T}{m^3}\right]$,

ΔV – maksymalna utrata objętości w wyniku ścierania [mm^3]

ε_B – odkształcenie przy zerwaniu [%],

ε_M – odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu [%],

ε_{tB} – odkształcenie nominalne przy zerwaniu [%],

$\lambda(t)$ – intensywności uszkodzeń taśmy,

$\Lambda(t)$ – oczekiwana liczba drobnych napraw taśmy na przenośniku od momentu założenia do czasu t ,

σ_B – naprężenie zrywające [MPa],

σ_m – maksymalne naprężenie [MPa],

σ_x – naprężenie przy zadanym odkształceniu względnym [MPa].

1. Wprowadzenie

Dzisiejszy przemysł zmierza w kierunku produkcji inteligentnej (ang. *Smart Manufacturing*), której istotnym elementem jest monitorowanie obiektów i procesów w czasie rzeczywistym (Zenisek i in., 2021). Zbieranie informacji o bieżących parametrach pracy umożliwia realizację „przewidującej obsługi technicznej” (ang. *Predictive Maintenance*), która w odróżnieniu od cyklicznej konserwacji urządzeń (tzw. „obsługi zapobiegawczej”, ang. *Preventive Maintenance*) pozwala na podjęcie odpowiednich działań naprawczych w zależności od aktualnego stanu obiektu (Waibel i in., 2018). Przenośnik taśmowy jest krytycznym elementem w systemach transportu materiałów, mającym szerokie zastosowanie w przemyśle. Jest on zaliczany do urządzeń pracujących w trybie ciągłym, transportujących zazwyczaj materiały ziarniste, proszkowe lub sypkie (Zeng i in., 2021). Powszechność stosowania przenośników (Lutyński, 1989) w liniach produkcyjnych branży wydobywczej, logistycznej (Błażej i in., 2020), produkcyjnej, inżynierii lądowej i wodnej (Fayed i in., 1996), wynika z szeregu niekwestionowanych zalet (Lutyński, 1989). Wyłania jednak szereg problemów, począwszy od strony teoretycznej i konstrukcyjnej, a kończąc na eksploatacyjnej, powodujących konieczność wykonywania złożonych badań, mających na celu ich rozwiązanie (Lutyński, 1989).

Przenośniki taśmowe znajdują zastosowanie głównie ze względu na ich walory eksploatacyjne, nieskomplikowaną budowę oraz niezawodność. Mogą pracować w miejscach, gdzie użycie innych środków transportu jest utrudnione lub praktycznie całkowicie niemożliwe, pozwalając na transport materiałów w halach produkcyjnych, kopalniach podziemnych i odkrywkowych, na terenach płaskich oraz tych o dużym kącie nachylenia. Mogą być wykorzystywane zarówno pojedyncze przenośniki taśmowe, jak i ich zestawy, tworzące niejednokrotnie długie magistrale transportowe (Subba Rao, 2021). Taśmy przenośników należą do najbardziej złożonych i najtrudniejszych do zdiagnozowania elementów (Kozłowski i in., 2020). Można je podzielić na dwie grupy: te o rdzeniu tekstylnym oraz takie, w których materiałem rdzenia jest stal (Subba Rao, 2021). Eksploatacja taśm przenośnikowych w wyniku działania wielu czynników fizycznych, biologicznych, chemicznych, prowadzi do degradacji ich właściwości mechanicznych i do uszkodzeń (Lutyński, 1989). Dlatego też, w celu uniknięcia awarii, konieczne jest nadzorowanie i ocena jej stanu. Metody wykrywania niezgodności (hasło niezgodność jest zdefiniowane w normie PN-EN ISO 9000:2015) w taśmach przenośnikowych zasadniczo można podzielić również na dwie grupy: detekcja kontaktowa, w której zazwyczaj jest dodany do taśmy element mechaniczny, oraz detekcja bezkontaktowa defektów, która może być oparta np. na wizji maszynowej (Zeng i in., 2021). Taśma jest najbardziej niebezpiecznym elementem przenośników, dlatego wymaga się, aby spełniała precyzyjne kryteria bezpieczeństwa, określone w zależności od miejsca instalacji przenośnika. Jest to szczególnie ważne, gdy przenośnik pracuje w atmosferze kontrolowanej lub wybuchowej (Hardygóra i in., 2014). Przecięcia wzdłużne lub przebicia są przyczyną znacznej części wszystkich zniszczeń taśm powodujących konieczność jej demontażu (Hardygóra i in., 2011), tym samym możliwości wystąpienia wypadków związanych z bezpiecznym eksploataowaniem przenośników. Dlatego też badania nad możliwością wczesnego wykrycia rozwijającego się uszkodzenia oraz zapobieganie rozerwaniu taśm przenośnikowych mają ogromne znaczenie (Bzinkowski i in., 2022). Czynnikiem ekonomicznym należy również brać pod uwagę rozpatrując problematykę wczesnej detekcji uszkodzeń przenośników taśmowych z wykorzystaniem różnych metod i systemów pomiarów, które zostały opisane w niniejszej pracy. Wykrywane na wczesnym etapie powstania niezgodności to między innymi: ścieranie, wyżłobienia, karby, przecięcia, rozprucia, wykruszenia powierzchni, nacięcia, przebicia, rozwarstwienia, pęcherze, korozja (Bortnowski i in., 2022). Ich wykrycie pozwala podjąć dedykowane działania, mające na celu zapobieganie awarii oraz przywrócenie przenośnika do stanu poprawnej pracy.

W zależności od typu uszkodzenia i jego wczesnego wykrycia istnieją metody pozwalające na regenerację taśm przenośników, co jest aktualnie kluczowym czynnikiem, zarówno ekonomicznym, jak i ze względu na ochronę środowiska (Dobrotã, 2015). Taśma regenerowana przy wykorzystaniu właściwej technologii oraz przeprowadzeniu dedykowanych do procesu zabiegów posiada zbliżone walory eksploatacyjne do nowej taśmy, co pozwala na jej ponowne zastosowanie oraz jest istotnym elementem dalszego właściwego eksploataowania (Lutyński, 1989). Na podstawie analizowanej literatury można stwierdzić, że aby zapobiec destrukcyjnemu uszkodzeniu taśmy przenośnika i uniknąć późniejszej wymiany lub złożonej naprawy i zatrzymania procesu produkcyjnego w wyniku jej rozerwania, konieczne jest wykrycie uszkodzenia taśmy przenośnika we wczesnym etapie powstawania (Błażej, 2022). Realizacja takiego sposobu detekcji niezgodności i uszkodzeń wymaga stosowania systemów pomiarów pracujących w czasie rzeczywistym podczas działania przenośnika, umożliwiających ocenę stanu technicznego taśmy przenośnika oraz podjęcie odpowiedniej decyzji, co jest zgodne z trendem rozwoju 4.0 (Jurdiak i in., 2020). Zagadnieniem kluczowym z punktu widzenia niezawodności przenośników taśmowych jest możliwość monitoringu w trybie ciągłym współpracujących elementów, ograniczając tym samym ilość wymaganych przeglądów oraz korzystnie wpływając na zmniejszenie ilości nieplanowych przestojów w danym procesie produkcyjnym (Bzinkowski i in., 2022). Dane literaturowe (Kirjanów-Błażej i in., 2023) wskazują, że wydatki rynkowe na wyposażenie monitorujące pracę przenośników wyniosły w 2018 r. blisko 200 mln USD, a w 2024 r. prognozuje się ich wzrost do blisko 250 miliardów USD. Świadczy to o rosnącym znaczeniu problematyki, podjętej w niniejszej rozprawie.

Niniejsza rozprawa dotyczy metod monitorowania pracy środka transportu bliskiego, jakim jest przenośnik taśmowy, w kontekście identyfikacji uszkodzeń i zapobiegania awariom. W drugim rozdziale sformułowano cel i tezy pracy, a także zakres podjętych działań, koniecznych do osiągnięcia postawionego celu. Następnie w rozdziale trzecim opisano aktualny stan wiedzy w zakresie przenośników i istniejących systemów monitorujących ich stan. Badania eksperymentalne, włącznie z metodyką i opisem stanowisk badawczych, zostały przedstawione w rozdziale czwartym. W szczególności, opisano właściwości badanej taśmy, budowę stanowiska do kalibracji czujników paskowych, umieszczonych na bębnie zwrotnym przenośnika, a także stanowisko umożliwiające symulację pracy przenośnika z zainstalowanym systemem tensometrycznym. Piąty rozdział zawiera wyniki pomiarów i ich omówienie. Przede wszystkim, w nim zostały opisane wyniki kalibracji i szacowania niepewności pomiaru, obliczony parametr powtarzalności wyników pomiarów przy różnych obciążeniach i położeniach kątowych bębna z tensometrami, a także wyniki pomiarów naciągu taśmy. Została przeprowadzona analiza przebiegów sygnału pomiarowego dla taśmy poruszającej się z różnymi prędkościami bez obciążenia, z obciążeniem i z uszkodzeniami. Dodatkowo opisano wyniki badań wytrzymałości materiału taśmy na zrywanie. Przedstawiono również wyniki analizy porównawczej przydatności kilku metod uczenia maszynowego do wykrywania stanu obciążenia taśmy. Na końcu (rozdział 6) dokonano podsumowania, w którym wyszczególniono ważniejsze cechy charakterystyczne badanego urządzenia, wyciągnięto wnioski z badań oraz zaproponowano dalsze kierunki badań, umożliwiające w przyszłości wdrożenie opracowanego rozwiązania.

2. Cel i zakres pracy

Celem naukowym było ustalenie zależności między stanem taśmy przenośnika w procesie transportu bliskiego a wskazaniem tensometrycznego systemu pomiarowego. Celem poznawczym i utylitarnym pracy było opracowanie i zbadanie możliwości innowacyjnego systemu monitorującego naciąg i uszkodzenia taśmy przenośnika w czasie rzeczywistym.

Przeprowadzona analiza literaturowa dotycząca pracy przenośników taśmowych wskazuje na potrzebę opracowania i zbadania prostego, niezawodnego systemu monitorującego pracę taśmy przenośnika w czasie rzeczywistym. Z danych literaturowych wynika, że spośród zagadnień dotyczących niezawodności przenośników taśmowych, kwestie dotyczące połączeń taśmy, jak i samej taśmy, należą do newralgicznych punktów wśród problemów eksploatacyjnych. Literatura przedmiotu wskazuje, że zwiększenie niezawodności elementów przenośników pozwala na obniżenie kosztów wynikających z pracy oraz zużycia eksploatacyjnego, a przede wszystkim na wyeliminowanie awarii i związanych z nimi wydatków i strat (Błażej i in., 2022). Można wnioskować, że brak ciągłego monitorowania pracy przenośników taśmowych przyczynia się do niespodziewanych przestojów.

Nacisk na zwiększanie czasu poprawnej i bezpiecznej pracy ma również swoje umocowanie w *Rezolucji Parlamentu Europejskiego z dnia 4 lipca 2017 r. w sprawie dłuższego cyklu życia produktów: korzyści dla konsumentów i przedsiębiorstw* 2016/2272 (INI). Dokument ten wskazuje, że sprecyzowana analiza stanu poszczególnych elementów przenośników w czasie rzeczywistym jest pożądanym elementem w przedsiębiorstwach użytkujących tego typu urządzenia, gdyż ułatwia opracowanie harmonogramu okresowych przeglądów technicznych i wymiany pracujących elementów znajdujących się w końcowej fazie okresu starzenia. W literaturze przedmiotu znaczną część uwagi poświęca się rozwiązaniom konstrukcyjnym ukierunkowanym na krytyczne punkty przenośnika taśmowego, takie jak zespół napędowy, wał napędowy oraz bierny, przekładnie, a także taśmy przenośnikowe (Gładysiewicz, 2003). Dostępne na rynku są systemy do pomiaru temperatury łożysk, poślizgu taśmy, zbiegu taśmy względem wału, naciągu taśmy (Hardygóra i in., 2014). Zastosowanie znajdują również najnowsze rozwiązania uwzględniające koncepcję *Przemysł 4.0*, np. optyczne monitorowanie powierzchni taśmy współpracujące z odpowiednim algorytmem wykrywającym wadę taśmy (Błażej i in., 2013). Innymi zaproponowanymi systemami zbudowanymi do monitorowania pracy przenośników taśmowych są: wielospektralna inspekcja wizualna, pomiar hałasu akustycznego, temperatury przekładni, zmiennego pola magnetycznego generowanego wokół defektów namagnesowanego przewodu stalowego oraz modele probabilistyczne.

Przedstawione rozwiązania oprócz posiadania oczywistych zalet są również obciążone wadami, przede wszystkim są kosztowne. Wysoki koszt dostępnych na rynku systemów oraz ich eksploatacji stanowi ważny argument przemawiający za potrzebą poszukiwania nowych rozwiązań. Poza tym szczególnie te rozwiązania, które dotyczą nadzorowania pracy taśmy przenośnikowej, są ukierunkowane na wykrywanie tylko pewnej części wad taśmy lub niepoprawności pracy taśmy w przenośniku. Proponowany innowacyjny układ (zgłoszenie patentowe nr P.447569) monitorujący naciąg taśmy w czasie pracy przenośnika posiada te zalety, że jest znacznie tańszy, jest elementem bezpośrednio połączonym z wałkiem i taśmą, ale nie podlega wymianie w wyniku uszkodzenia taśmy przenośnikowej, a także jest rozwiązaniem bardziej ekologicznym ze względu na sposób recyklingu zużytej taśmy, której nie trzeba oddzielać od sprawnych czujników.

Kolejnym aspektem, dotyczącym przenośników taśmowych, szeroko omawianym w literaturze, jest kwestia bezpieczeństwa i higieny pracy przy przenośnikach, w tym przy przenośnikach taśmowych. Monitorowane przez agencję OSHA (ang. *Occupational Safety and Health Agency*) wypadki oraz sprecyzowane w normie ISO 45001:2018 wytyczne dotyczące systemu zarządzania i bezpieczeństwem pracy, wskazują na konieczność precyzyjnego zbierania danych

dotyczących wypadków oraz szczegółowej analizy przyczyn ich powstawania. Publikowane informacje odnośnie do różnego typu urazów oraz ofiar śmiertelnych (Živanić i in., 2021) wskazują na konieczność ciągłego doskonalenia i tworzenia nowych systemów nadzorujących które mogą zapobiec nie tylko destrukcyjnemu uszkodzeniu przenośników, ale przede wszystkim jakimkolwiek uszczerbku na zdrowiu.

Zastosowanie zaproponowanego w niniejszej rozprawie systemu pozwoli na zgromadzenie dużej ilości danych, dotyczących historii pracy taśmy w przenośniku, co ułatwi analizę informacji dotyczących planowanych wymian taśmy (Błażej i in., 2022) oraz zwiększy możliwość zapobiegnięcia potencjalnym wypadkom.

W związku z postawionym celem pracy, sformułowano następującą tezę naukową:

Taśma przenośnikowa w procesie transportu wywiera na bęben przenośnika zróżnicowane naciski, zależne od obciążenia i uszkodzeń, których identyfikacja jest możliwa za pomocą tensometrycznego układu pomiarowego.

Do udowodnienia tak sformułowanej tezy należy ustalić powiązania między stanem taśmy przenośnikowej, w tym jej obciążeniem, prędkością posuwu i uszkodzeniami, a przebiegiem sygnału, rejestrowanego przez tensometry. W związku z tym sformułowano następujące tezy pomocnicze:

Tensometryczny układ pomiarowy daje możliwość monitorowania w czasie rzeczywistym siłę nacisku taśmy na bęben.

Tensometryczny układ pomiarowy pozwala na pozyskanie informacji o prawidłowej pracy przenośnika.

Oddziaływanie taśmy obciążonej lub uszkodzonej na tensometryczny układ pomiarowy pozwala na identyfikację obciążenia oraz na wykrywanie uszkodzeń taśmy przenośnikowej.

Udowodnienie tak sformułowanej tezy głównej oraz pomocniczych pozwoli na osiągnięcie celu użytecznego, którym jest opracowanie innowacyjnego systemu monitorującego pracę taśmy przenośnika o niewielkich kosztach, zwiększającego bezpieczeństwo pracy przenośnika i pozwalającego zapobiec awariom.

Do osiągnięcia celu i udowodnienia postawionych tez wykonano prace w następującym zakresie:

- analiza literaturowa dotyczącą przenośników taśmowych i metod monitorowania ich pracy w czasie rzeczywistym,
- zmodyfikowanie urządzenia pomiarowego z wykorzystaniem tensometrów paskowych,
- zbudowanie stanowiska do kalibracji tensometrów, rozmieszczonych na wałku przenośnika,
- wykonanie kalibracji czujników tensometrycznych i wyznaczenie niepewności pomiaru,
- zbadanie właściwości mechanicznych zastosowanej w eksperymentach taśmy,
- wykonanie serii pomiarów bez obciążenia, z obciążeniem oraz z uszkodzeniem taśmy,
- opracowanie i analiza wyników eksperymentów,
- wstępna analiza przydatności uczenia maszynowego do analizy pozyskanych danych,
- wnioski i zalecenia do dalszych badań.

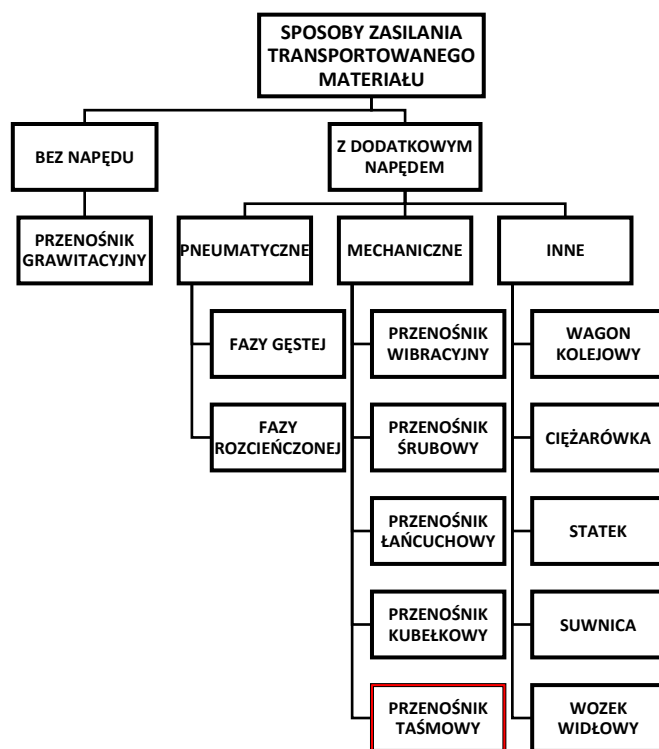
Wykonanie badań w powyższym zakresie pozwoli na dokonanie rzetelnej oceny możliwości identyfikacji stanu taśmy przenośnika za pomocą tensometrycznego systemu pomiarowego. Osiągnięcie celu użytecznego umożliwi utworzenie niedrogiego tensometrycznego systemu pomiarowego, zdolnego do monitorowania w czasie rzeczywistym stanu taśmy przenośnika z odpowiednią dokładnością i wysoką zdolnością identyfikowania uszkodzeń.

3. Analiza istniejących rozwiązań

3.1. Podział i budowa przenośników

Przenośniki można zdefiniować jako stacjonarne i przenośne urządzenia mające zdolność do przemieszczania materiału w sposób przerywany lub ciągły, pomiędzy dwoma lub więcej punktami, według ustalonej wcześniej trasy. Jednocześnie materiał może być transportowany z przerwami w trakcie ciągłego działania napędu. Ruch przemieszczanego materiału może być pionowy, poziomy, nachylony pod dowolnym kątem lub składający się z ich kombinacji. Przenośniki jako rodzaj ciągłego systemu transportu materiałów, są nieodłączną częścią procesu logistycznego wykorzystującego nowoczesne metody produkcji, mają szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki począwszy od przetwórstwa spożywczego i produkcji przemysłowej, kończąc na przemyśle wydobywczym zapewniając płynny przepływ materiałów.

Podstawowy podział przenośników do transportu materiałów to ten, w którym możemy wydzielić je ze względu na rodzaj napędu jak pokazano na rys. 3.1 tj. systemy bez napędu oraz systemy z napędem. Beznapędowe systemy transportu wykorzystują siłę grawitacji jako siłę napędową, koniecznym w tym przypadku jest, aby punkt początkowy przenośnika znajdował się na wyższej wysokości od punktu końcowego, tego typu rozwiązanie obejmuje proste urządzenia takie jak prowadnice oraz rynny mając zastosowanie tylko w wyspecjalizowanych przypadkach i miejscach ze względu na złożenia konstrukcyjne i technologiczne. Systemy transportu wykorzystujące napęd mają zdecydowanie szersze zastosowanie, potrafią przemieszczać materiał w kontrolowany sposób na duże odległości z możliwością transportu w poziomie, w nachyleniu, gdy punkt początkowy jest na niższej odległości niż końcowy lub w pionie oraz dowolnej kombinacji wcześniej wymienionych. Przenośnik z zastosowanym napędem można również podzielić ze względu na typ wymuszonego napędu (Fayed i in., 1996).



Rys. 3.1. Sposoby zasilania transportowanego materiału (Fayed i in., 1996)

Przenośniki i podajniki można poddawać różnej klasyfikacji na podstawie różnych kryteriów. Są one zaliczane do urządzeń transportu ciągłego, a różnorodność i ilość typów rozwiązań konstrukcyjnych oraz podział ze względu na rodzaj zastosowania obrazują tabele: 3.1, 3.2 i 3.3.

W dalszej części pracy zostały opisane wybrane rozwiązania i zastosowania urządzeń, ze szczególnym uwzględnieniem przenośników taśmowych, dla których został wykonany system pomiarowy do oceny stanu taśmy.

Tab. 3.1. Urządzenia transportu ciągłego do materiałów masowych luzem (PN ISO 2148:1998)

Urządzenia do magazynowania	Przenośniki i podnośniki	
Przenośniki taśmowe podwieszane	Przenośniki taśmowe	Przenośniki płytowe płaskie
Podajniki	Przenośniki taśmowe stałe	Przenośniki płytowe korytowe
Podajniki taśmowe	Przenośniki taśmowe ruchome	Przenośniki płytowe skrzynkowe
Podajniki płytowe	Przenośniki taśmowe przenośne	Przenośniki zgrzeblowe
Podajniki zgarniakowe	Przenośniki taśmowe przewoźne	Przenośniki zgarniakowe
Podajniki łańcuchowe kurtynowe	Przenośniki taśmowe przejezdne rewersyjne	Przenośniki wstrząsowe wstrząsane
Podajniki obrotowe łopatkowe poziome	Przenośniki taśmowe przesuwne	Przenośniki wstrząsowe wibracyjne
Podajniki śrubowe	Przenośniki taśmowe łańcuchowe i linowe	Przenośniki śrubowa
Podajniki wstrząsowe wibracyjne	Przenośniki taśmowe z taśmą stalową	Przenośniki śrubowe pionowe
Podajniki wstrząsowe wstrząsane	Przenośniki taśmowe z taśmą metalową siatką	Przenośniki śrubowe rurowe z obracającą się rurą
Podajniki obrotowe bębnowe	Przenośnikowe stoły przebiegowe	Przenośniki kubełkowe
Podajniki obrotowe łopatkowe	Przenośniki miotające	Przenośniki kubełkowe grawitacyjne okrężne
Podajniki obrotowe talerzowe	Przenośniki taśmowe z zamkniętą taśmą	Przenośniki hydrauliczne
	Przenośniki płytowe	Przenośniki podwieszone jednotorowe (ciągłe, z napędem silnikowym)
		Przenośniki podwieszone jednotorowe z zamkniętym systemem transportu

Tab. 3.2. Pneumatyczne urządzenia transportowe do materiałów masowych luzem (PN ISO 2148:1998)

Instalacje		Urządzenia zasilające
Rynny aeracyjne	Zamknięcia lub podajniki z osią poziomą	Podajnik zamykający z dmuchawą
Urządzenia zasilające i rozładunkowe	Zamknięcia lub podajniki z osią pionową	Podajnik ze zwężką Venturiego
Zamknięcia lub podajniki obrotowe	Podajnik śrubowy (niskociśnieniowy)	

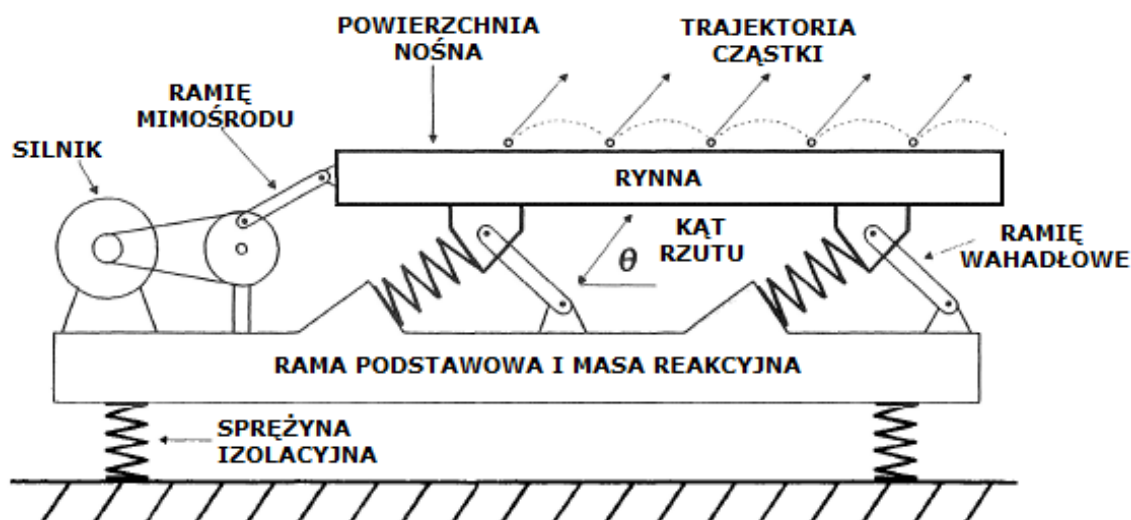
Tab. 3.3. Urządzenia transportu ciągłego do ładunków jednostkowych (PN ISO 2148:1998)

Przenośniki i podnośniki napędzane	Przenośnikowe stoły montażowe z taśmą metalową siatkową	Przenośniki wałkowe napędzane
Przenośniki taśmowe (taśma tkaninowa, gumowa, z tworzywa sztucznego itp.)	Przenośnikowe stoły montażowe płytowe i paletowe	Przenośniki wałkowe napędzane za pomocą łańcucha
Przenośniki taśmowe stałe	Przenośniki płytowe okrężne (poziome)	Przenośniki wałkowe napędzane za pomocą taśmy
Przenośniki taśmowe przewoźne	Przenośniki łańcuchowe podwieszane	Przenośniki wałkowe napędzane za pomocą tarcia
Przenośniki taśmowe teleskopowe	Przenośniki łańcuchowe podwieszane jednotorowe	Przenośniki z łańcuchem transportującym
Przenośniki taśmowe z taśmą stalową	Przenośniki łańcuchowe podwieszane jednotorowe ciągnące wózki jezdniowe	Przenośniki łańcuchowe z taśmą płytową
Przenośniki taśmowe z taśmą metalową siatkową	Przenośniki łańcuchowe podwieszane dwutorowe	Przenośniki pneumatyczne
Przenośniki taśmowe z taśmą metalową siatkową prostą	Przenośniki z kołyskami wahliwymi	Przenośniki hydrauliczne
Przenośniki taśmowe z taśmą metalową siatkową łukową	Przenośniki z kołyskami stałymi (zawieszonymi w narożnikach)	Chodniki ruchome
Przenośniki płytowe (płyty metalowe lub drewniane)	Przenośniki zabierakowe prętowe	Przenośniki grawitacyjne
Przenośniki płytowe stałe (płyty metalowe lub drewniane)	Przenośniki podłogowe	Przenośniki taśmowe
Przenośniki płytowe przewoźne (płyty metalowe lub drewniane)	Przenośniki podłogowe wózkowe jednociegnowe obwodowe Łańcuch ponad podłogą	Przenośniki wałkowe grawitacyjne zwykłe
Przenośniki sterujące	Przenośniki podłogowe wózkowe jednociegnowe obwodowe Łańcuch pod podłogą	Przenośniki wałkowe grawitacyjne przedłużalne lub teleskopowe
Przenośnikowe stoły montażowe	Przenośniki podłogowe wózkowe jednociegnowe prostoliniowe Łańcuch ponad podłogą	Przenośniki wałkowe uchylne (przejścia)
Przenośnikowe stoły montażowe z taśmą gumową	Podnośniki i przenośniki kieszeniowe	Przenośniki krążkowe
Przenośnikowe stoły montażowe z taśmą stalową	Przenośniki kieszeniowe	Przenośnikowe zsuwnie wałkowe spiralne

Dobór odpowiedniego rozwiązania konstrukcyjnego, określenie typ przenośnika, całego systemu transportu opiera się na analizie i charakterystyce materiału, który ma być transportowany. Wynika to z faktu, że specyficzne cechy materiałów np. działanie korozyjne lub ściernie będące definiować konkretne rozwiązanie konstrukcyjne przenośnika. Projektowane systemy transportu uwzględniają cechy fizyczne oraz chemiczne materiałów transportowanych, dlatego też pewne rodzaje przenośników nie znajdują zastosowania, np. od gęstości nasypowej będzie zależeć wydajność przenośnika która jest skorelowana z prędkością roboczą (Fayed i in., 1996). W dalszej części rozprawy zostało opisane kilka rozwiązań technicznych przenośników w celu porównawczym tj. przedstawiania ich możliwości transportowych oraz odniesienia do przenośników taśmowych.

3.1.1. Przenośnik wibracyjny

Przenośniki wibracyjne są wydajnymi i niezawodnymi urządzeniami, przemieszczają materiał w wyniku wielokrotnego wyrzucania go na niewielkie odległości, w wyniku ruchu wibracyjnego sprzyjającego przepływowi materiał opuszcza powierzchnię przenośnika i ulega przesunięciu. Przenośniki wibracyjne (rys. 3.2) są używane do transportowania materiałów sypkich, mają szerokie zastosowanie, używane są np. w przemyśle farmaceutycznym, budownictwie, górnictwie oraz hutnictwie, mogą transportować praktycznie każdy materiał sypki, również ten o dużych bryłach na pewne odległości. W zależności o typu konstrukcji rynna przenosząca materiał może być wyposażona w systemy chłodzenia oraz być wyłożona materiałem żaroodpornym, pozwalając na przemieszczanie materiałów o temperaturze do 1650°C. Przenośniki charakteryzują się łatwością automatyzacji, niską energochłonnością oraz cichą pracą (Fayed i in., 1996).



Rys. 3.2. Schemat przenośnika wibracyjnego (Fayed i in., 1996)

Główne elementy składowe przenośnika to: rynna, na której znajduje się transportowany materiał, układ napędowy - wibrator oraz różnego typu podpory. Ruch wibracyjny rynny jest wytwarzany przez układ napędowy w opisanym przypadku jest to silnik oraz element mimoosiowy. Wibratory można podzielić ze względu na sposób działania na reakcyjne, mimoosiowe, bezwładnościowe oraz ciśnieniowe, natomiast sposoby zasilania na mechaniczne, pneumatyczne oraz elektromagnetyczne. Rynna jest zamontowana na ramie podstawowej pełniącej rolę konstrukcji nośnej. Rama podstawowa jest przymocowana do podłoża na sprężynach izolacyjnych, zmniejszając tym samym drgania przenoszone na podłoże (Fayed i in., 1996). Wydajność przenośników wibracyjnych przedstawia wzór (Gózdziecki i in., 1979):

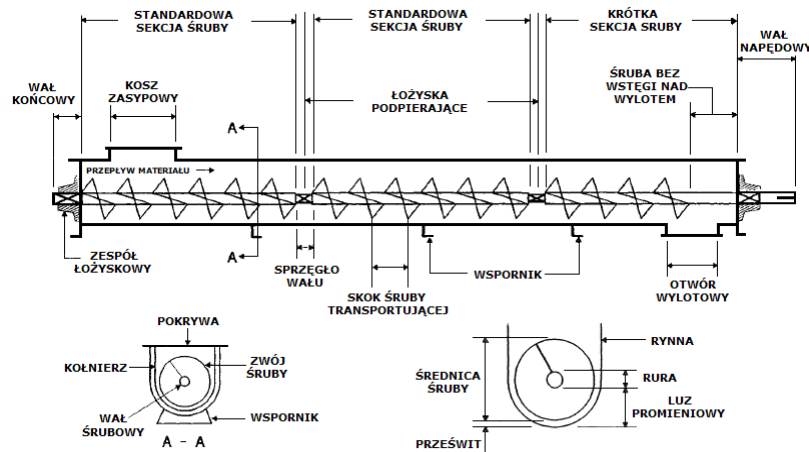
$$Q = 3600 \cdot F \cdot \gamma \cdot v_{sr} \left[\frac{T}{h} \right], \quad (3.1)$$

gdzie: F – przekrój warstwy materiału w odniesieniu do przekroju koryta rury [m^2], v_{sr} – średnia prędkość ruchu materiału [$\frac{m}{s}$], γ – ciężar usypowy transportowanego materiału [$\frac{m^3}{h}$].

Zasada działania polega na zjawisku, podczas którego transportowany materiał będący na rynnie przenośnika poddanej prostoliniowym drganiom harmonicznym na kierunku nachylonym względem osi rynny pod kątem prostym, na skutek drgań materiał jest okresowo podrzucany w wyniku działania siły bezwładności oraz przemieszczany wzdłuż rynny (Furmanik, 2008).

3.1.2. Przenośnik śrubowy

Przenośnik śrubowy nazywany też ślimakowym jest bardzo wszechstronnym oraz jednym z najstarszych typów przenośników, pierwotny został wymyślony przez Archimedesesa. Współcześnie używane zbudowane z drewna po modernizacji i wykorzystaniu obecnie dostępnych materiałów są w powszechnym użyciu. Aktualny wysoki stopień standaryzacji powoduje, że przenośnik ślimakowy jest bardzo ekonomiczną i elastyczną formą transportu materiałów. Wszechstronne zastosowanie znajduje w przemyśle spożywczym, budowlanym oraz spożywczym, służy do transportu. Stosowane rozwiązania konstrukcyjne jak dodanie odpowiednich uszczelnień i pokryw umożliwiają wykonanie przenośników jako odporne na warunki atmosferyczne, pyłoszczelne lub pracujące w atmosferze ochronnej. Połączenie śrub, które mają wykonane na wale wstęgi ślimaka nawinięte w przeciwnym kierunku pozwala na transport materiału z dwóch przeciwnych kierunków co jest ich niewątpliwą zaletą. Przesuwanie materiału odbywa się przez jego popychanie przez zwoje śruby, każdy obrót powoduje przemieszczanie o jedną długość skoku, wzdłuż dna i boków rynny. Każdy obrót śruby przenośnika przesuną materiał o jedną długość skoku (Fayed i in., 1996).



Rys. 3.3. Schemat przenośnika śrubowego (Fayed i in., 1996)

Główne elementy przenośnika śrubowego ilustruje rys. 3.3, to obracająca się śruba – ślimak powodująca przesuwanie materiału z kosza zasypowego do otworu wylotowego. Śruby można łączyć ze sobą, przedłużać w celu dopasować do wymaganej długości przenośnika. Rynna jest również składana z odcinków o standardowych lub spersonalizowanych długościach, gdy wymaga tego długość przenośnika oraz w zależności od zastosowania ma jeden lub więcej koszy zasypowych i otworów wylotowych. Wały napędowy oraz końcowy są osadzone w łożyskach oraz zabezpieczone uszczelniającami, natomiast łącznie sekcji śruby jest podparte łożyskami podporowymi. Wydajność przenośników śrubowych przedstawia wzór (Góździcki i in., 1979):

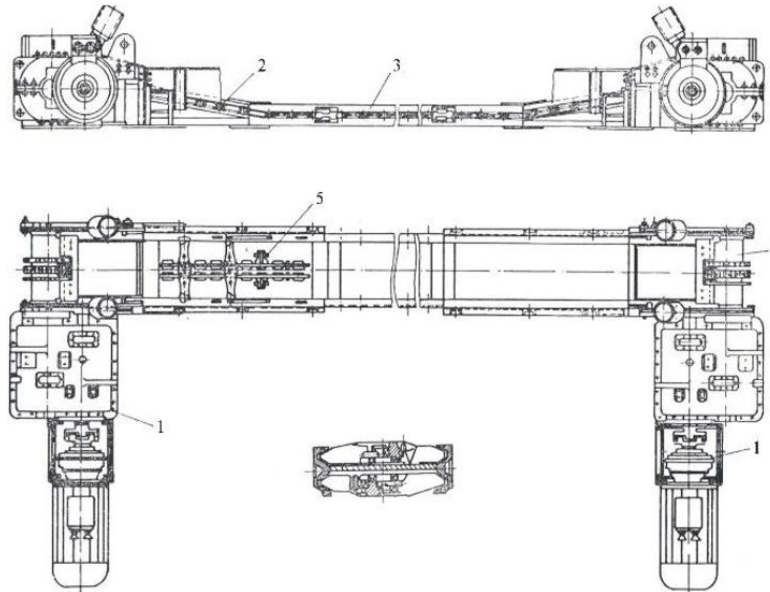
$$Q = W \cdot \gamma = \left(60 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \cdot n \cdot \psi \cdot k \right) \cdot \gamma \left[\frac{T}{h} \right], \quad (3.2)$$

gdzie: W – wydajność objętościowa $\left[\frac{m^3}{h} \right]$, γ – ciężar usypowy transportowanego materiału $\left[\frac{T}{m^3} \right]$, D – średnica ślimaka [m], S – skok ślimaka [m], n – prędkość obrotowa wału śrubowego, ψ – współczynnik napełnienia, k_p – współczynnik pochylenia przenośnika względem poziomu.

Standardowy przenośnik śrubowy ma zastosowanie do podnoszenia materiału, tylko przy niewielkich wartościach kątach pochylenia od podłoża wynoszących poniżej 15° oraz odległości 30 m przy użyciu jednego przęsła, odpowiednie modyfikacje pozwalają zwiększyć wartość do 45°, a specjalna konstrukcja nazywana pionową śrubą podnoszącą daje możliwość podnoszenie materiałów pod kątem prostym (Fayed i in., 1996).

3.1.3. Przenośnik zgrzeblowy

Przenośnik zgrzeblowy jest rodzajem przenośnika zabierakowego zaliczającego się do szerokiej grupy przenośników ciągłych. Zasada działania polega na przesuwaniu urobek w sposób ciągły w określone miejsce przy pomocy łańcucha, do którego są przytwierdzone w równych odstępach poprzeczne elementy nazywane zgrzeblami. Przenośnik jest zbudowany (rys. 3.4) z części stanowiących napęd główny I, bezkońcowego ciągną łańcuchowego pracującego w rynnie, oraz zwrotni w przypadku przenośników hamujących lub napędu pomocniczego w przypadku przenośników przesuwających (Suchoń, 2012).



Rys. 3.4. Schemat budowy przenośników zgrzeblowych (Florea i in., 2023)

1 – napęd, 2 – rynna korytkowa, 3 – rynna główna, 4 – koło łańcuchowe, 5 – zgrzebla i łańcuch

Łańcuch zgrzeblowy jest głównym elementem przenośnika składa się z zgrzebeł rozmieszczonych w jednakowych odległościach. Istnieje wiele typów łańcuchów zgrzeblowych, w zależności od zastosowania przenośnika można wyróżnić np.: najprostsze łańcuchy pociągowe sworzniowo- tulejowe oraz rolkowe podobne do tych które są stosowane w przenośnikach kubelkowych, inne to łańcuchy widełkowe, które są zbudowane ze specjalnie ukształtowanego ogniwa oraz sworznia). Wydajność przenośników zgrzeblowych przedstawia wzór (Gózdziecki i in., 1979):

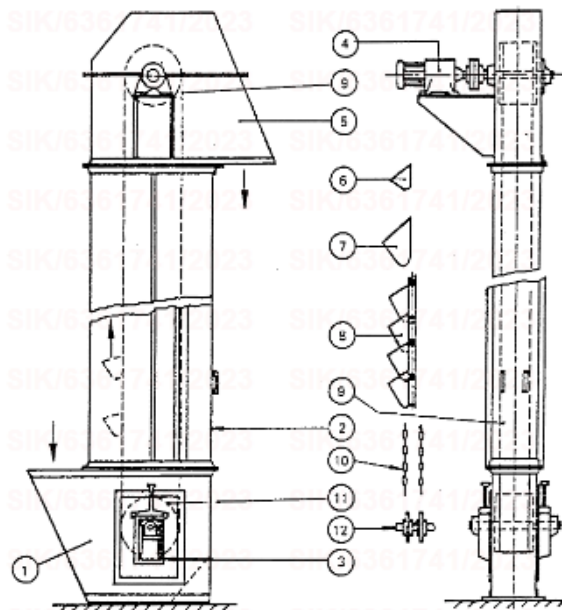
$$Q = 3600 \cdot K \cdot h^2 \cdot v \cdot \psi \cdot C \cdot \gamma \left[\frac{T}{h} \right], \quad (3.3)$$

gdzie: $K = \frac{B}{h}$, B – szerokość koryta [m], h – wysokość koryta [m], γ – ciężar usypowy transportowanego materiału $\left[\frac{T}{m^3} \right]$, v – prędkość łańcucha $\left[\frac{m}{s} \right]$, ψ – współczynnik napełnienia koryta, C – współczynnik zależny od właściwości materiału.

Przenośniki zgrzeblowe znajdują szerokie zastosowania w przemyśle wydobywczym, są przystosowane do pracy w ciężkich warunkach górniczych, charakteryzują się dużą wydajnością nawet przy niewielkich poprzecznych rozmiarach rynien oraz możliwością transportu materiału pod dużym nachyleniem. Przenośniki w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego można podzielić ze względu na liczbę i rozmieszczenie łańcuchów oraz napędów, mają możliwość wydłużania i skracania oraz przesuwania, mogą pracować w skrajnie ekstremalnych warunkach o znacznym zapyleniu i wilgoci (Suchoń, 2012).

3.1.4. Przenośnik kbelkowy

Przenośnik kbelkowy, którego budowę ilustruje rys. 3.5, poza możliwością przemieszczania materiału jest jednym z nielicznych przenośników używanych przede wszystkim do podnoszenia. Posiada prostą konstrukcję składającą się z pętli łańcucha przez co może być brany pod uwagę jako jeden z typów przenośnika łańcuchowego lub taśmowego, gdy ciągnem jest taśma przesuwanego się odpowiednio po bębnach. Najbardziej charakterystyczny element to kbelki, które są równo rozmieszczone i przymocowane do taśmy bądź łańcucha. Napęd przenośnika zazwyczaj znajduje się w jego górnej części, a całość elementów jest zamocowana na ramie wyposażonej w podpory. Znaczna część przenośników ma samonośną i zamkniętą konstrukcję (Fayed i in., 1996), można je podzielić ze względu na kierunek przemieszczania materiału: na proste w przypadku transportu powyżej kąta 70° lub oraz okrężne, gdy kbelki przemieszczają się po kombinacji trasy poziomej i pionowej (Gózdziecki i in., 1979).



Rys. 3.5. Podnośnik kbelkowy (PN-ISO 2148:1998)

1 – zasyp, 2 – obudowa, 3 – napinacz, 4 – zespół napędowy, 5 – wysyp, 6 – kbelki płytki, 7 – kbelki głębokie, 8 – kbelki typu ciągłego, 9 – taśma, 10 – łańcuch, 11 – bęben taśmowy, 12 – koła łańcuchowe

Przenośniki kbelkowej znajdują zastosowanie w transporcie materiałów sypkich, jednak ze względu na konieczność opróżniania kbelków nie sprawdzają się w transporcie materiałów lepkich (Gózdziecki i in., 1979) osiągają wydajności w granicach 10-700 t/h oraz mogą przenosić materiały na wysokości rzędu 50 m (Furmanik, 2008). Wydajność przenośników kbelkowych przedstawia wzór (Gózdziecki i in., 1979):

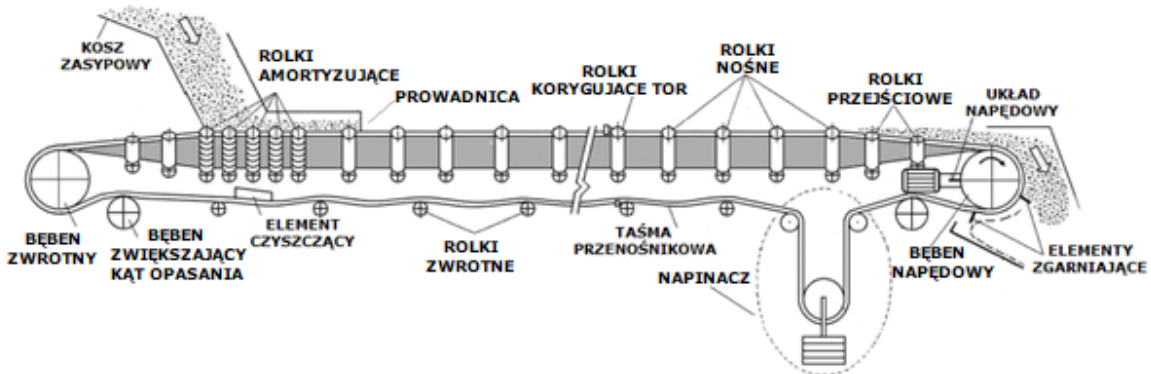
$$Q = 3,6 \cdot \frac{u_0}{a} \cdot v \cdot \gamma \cdot \psi \left[\frac{T}{h} \right], \quad (3.4)$$

gdzie: u_0 – użyteczna pojemność kbelka [dm^3], v – prędkość ruchu kbelków [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$], γ – ciężar usypowy transportowanego materiału [$\frac{\text{T}}{\text{m}^3}$], ψ – współczynnik napełnienia kbelków, a – odległość między kbelkami [m].

Przenośniki znajdują zastosowanie w transporcie materiałów budowlanych oraz pochodzących z przemysłu wydobywczego. W koparkach wielonaczyniowych osiągają wydajności kilku tysięcy m^3/h , cechują się możliwością szczelnego transportu pyłących frakcji przy zastosowaniu zamkniętej konstrukcji (Furmanik, 2008).

3.1.5. Przenośnik taśmowy

Przenośnik taśmowy jest najczęstszym środkiem transportu materiałów sypkich (Subba Rao, 2021), oraz najczęściej stosowaną formą przenośnika mechanicznego (Fayed i in., 1996), przy jego pomocy można przenosić większą różnorodność produktów wielokrotnie z szybkością tysięcy ton na godzinę w jednolitym i ciągłym strumieniu na odległości sięgające kilkudziesięciu kilometrów, a odległość na jaką pas może przenosić materiał jest ograniczona założeniami projektowymi. W porównaniu ze znaczną większością innych środków transportu materiałów sypkich charakteryzuje się niższymi kosztami transportu i konserwacji, a eksploatacja cechuje się niskimi nakładami pracy i energii, z tego powodu znajduje zastosowanie w niebranych wcześniej pod uwagę zastosowaniach (Subba Rao, 2021). Wszechstronność i popularność przenośników taśmowych do transportu materiałów masowych luzem oraz ładunków jednostkowych potwierdzają tab. 3.1-3.3, w której różne typy przenośników taśmowych stanowią znaczną grupę spośród wszystkich wymienionych (PN ISO 2148:1998). Standardowy przenośnik taśmowy jest zbudowany z dwóch bębnow, ciągłej pętli taśmy nazywanej przenośnikową, która przemieszcza się wokół bębnow, elementu podporowego taśmy pomiędzy bębnow. Jeden z bębnow napędowych jest sprzęgnięty z silnikiem powoduje to obrót bębna, przesuwa taśmę i materiał na taśmie do przodu, drugi to bęben zwrotny. Stosowane przemysłowo przenośniki taśmowe (rys. 3.6) zawierają znacznie więcej elementów, które umożliwiają transport różnorodnych materiałów, zapewnią wszechstronność stosowania (Subba Rao, 2021).



Rys. 3.6. Przenośnik taśmowy (Subba Rao, 2021)

Przenośniki taśmowe mogą w zależności od rozwiązania konstrukcyjne odbierać i doprowadzać materiał do wyznaczonych punktów na swojej długości, oraz pełnić inne funkcje procesowe w trakcie procesów obróbki jak sortowanie i zbieranie ręczne lub zagarnianie zautomatyzowane poruszającego się na taśmie materiału. Charakteryzują się wytrzymałą i odporną na niekorzystne warunki eksploatacyjne budową, mogą pracować w środowisku o dużym zapyleniu oraz zalaniu wodą (Subba Rao, 2021).

Przenośniki taśmowe znajdują zastosowanie w kopalniach odkrywkowych i podziemnych, przemyśle hutniczym, oraz transportu portowego, nadają się do używania w cementowniach zakładach chemicznych i elektrociepłowniach (Hardygóra i in., 2022), oraz są używane w obszarach logistyki przemysłu spożywczego i innych. W miejscach, gdzie jest wymagany ciągły transport materiału, przenośniki stanowią główną grupę systemu transportowego. Przenośniki taśmowe można stosować w różnych typach terenu o różnych kątach nachyleń (tab. 3.4), charakteryzują się elastyczną ścieżką przejazdu, pozwalają na wielokrotnie wydłużanie tras i łączenie odcinków (Subba Rao, 2021), osiągając długości wielu kilometrów (Hardygóra i in., 2022).

Tab. 3.4. Zakres stosowania różnych typów przenośników taśmowych (Antoniak, 2007)

Typ przenośnika (rodzaj taśmy)	gładka	ze wzorami na pow. nośnej	przenoś. rurowy	z ukośnymi występami	z progami lub z taśmą skrzynkową	nośna z taśmą przykrywającą	przenośnika kubelkowego	typu Flexowell
Kąt nachylenia przenośnika α_P [°]	0 - 20	20 - 35	20 - 35	35 - 45	45 - 60	60 - 87	87 - 90	0 - 90
Prędkość taśmy V [m/s]	0 - 8	0 - 3 5 - 6*	0 - 3 5 - 6*	0 - 3 5 - 6**	0 - 3	0 - 2	0 - 2	0 - 3
Wielkość transportowanej bryły [mm]	0 - 500 ***	0 - 200	0 - 200	0 - 200	0 - 300	0 - 300	0 - 350	0 - 50

* przenośnik rurowy, ** do kąta 40°, *** (0,3 szer. taśmy)

Rozbudowany system przenośników umożliwi pobieranie i segregowanie próbek przemieszczanego materiału, w wyniku zmiany kierunku strumienia materiału z jednego na inne przenośniki, oraz wykonywania ważenia transportowanego materiału (Fayed i in., 1996). Rzeczywistą wydajność przenośników kubelkowych przedstawia wzór (Gózdziecki i in., 1979):

$$Q_t = 3600 \cdot F \cdot \gamma \cdot V \cdot k_1 \cdot k_2 \left[\frac{T}{h} \right], \quad (3.5)$$

gdzie: F – przekrój strumienia materiału [m²], γ – ciężar usypowy transportowanego materiału $\left[\frac{T}{m^3} \right]$,

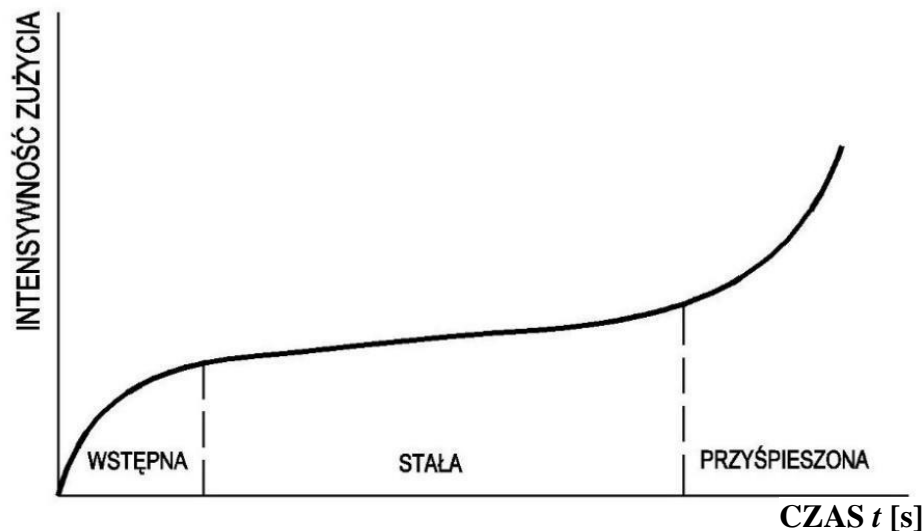
V – prędkość taśmy $\left[\frac{m}{s} \right]$, k_1 – współczynnik zmniejszający zależny od kąta pochylenia trasy α_P ,

k_2 – współczynnik uwzględniający nierównomierność podawanego materiału.

Do zalet przenośników taśmowych można zaliczyć ich: ekonomiczność i bezpieczeństwo eksploatacji, niezawodność, właściwie nieograniczony poziom wydajności oraz akceptowalność środowiskową w porównaniu z innymi środkami transportu (Subba Rao, 2021). Inne ważne cechy to łatwość automatyzacji, dużą wydajność, niewielkie wymiary w przekroju poprzecznym oraz niskie naciski jednostkowe na podłoże i możliwość zastępowania innych środków transportu. Mnogość oraz uniwersalność zastosowań przenośników czyni z nich urządzenia stosowane praktycznie we wszystkich działy gospodarki (Furmanik, 2008).

3.2. Taśmy przenośnikowe

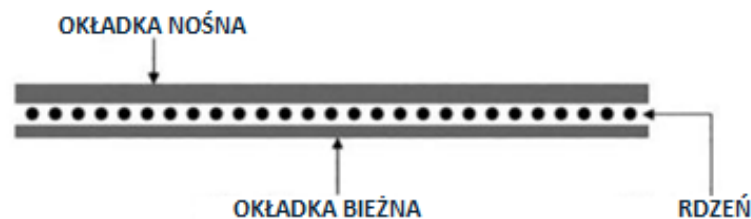
Taśma przenośnika to najbardziej newralgiczny oraz najdroższy element przenośnika taśmowego. Ma ona bezpośredni kontakt z przenoszonym materiałem, w wyniku czego jest najbardziej podatną na uszkodzenia częścią przenośnika, wybór odpowiedniego rodzaju taśmy powinien być wykonany z drobiazgową starannością (Subba Rao, 2021). Taśma przenośnika użytkowana w normalnych warunkach eksploatacji podlega naturalnemu zużyciu, którego przebieg ilustruje wykres na rys. 1.9, oraz losowym uszkodzeniom (Lutyński, 1989).



Rys. 3.7. Charakterystyka zużycia (Górecki i in., 1998)

Taśma jako podstawowy element przenośnika składa się z komponentów ukazanych na rys. 3.8, a mianowicie (Fayed i in., 1996):

- Rdzenia, który spełnia podstawowe funkcje taśmy: absorbuje siłę uderzenia materiału układanego na taśmę, zapewnia wytrzymałość na rozciąganie, która jest niezbędna do poruszania się załadowanej taśmy, oraz sztywność poprzeczną wymaganą do podtrzymania transportowanego ładunku pomiędzy bębnami, zapewnia odpowiednią wytrzymałości dla kłamek mechanicznych łączących końce taśmy.
- Okładki nośnej, która ma za zadanie chronić górną część taśmy przed transportowanym materiałem. Oślania rdzeń przed niekorzystnymi właściwościami przenoszonego materiału oraz absorbuje oddziaływanie ściernie przy załadunku materiału. Bieżnik górny musi wytrzymać wszelkie niekorzystne warunki środowiskowe, na które będzie narażony.
- Okładki bieżnej, którego jest zazwyczaj cieńszy niż górny, ma za zadanie ochronę rdzenia przed zużyciem w wyniku kontaktu z bębnami przenośnika.



Rys. 3.8. Taśma przenośnikowa (Subba Rao, 2021)

Podstawowy podział taśm przenośnikowych jest oparty na różnicy materiałów zastosowanych w charakterze rdzenia. Wyróżnia się (Subba Rao, 2021):

- Taśmy z rdzeniem tekstylnym, które składają się z jednej lub większej ilości warstw impregnowanej oraz zabezpieczonej po obu stronach gumą osnowy, mają odsłoniętą lub formowaną krawędź boczną.
- Taśmy z rdzeniem stalowym, które składają się z warstw równoległych względem długości taśmy stalowych linek zawulkanizowanych w gumie.

3.2.1. Taśma przenośnikowa z rdzeniem tekstylnym

W jednowarstwowej taśmie tekstylnej warstwa tkaniny znajduje się pomiędzy okładkami (ang. *cover*) nośną i bieżną. Tekstylny rdzeń (ang. *carcass*) taśmy ma za zadanie przenoszenie obciążeń wzdłużnych i poprzecznych oraz usztywniać taśmę (Antoniak, 2007). Większość taśm zawiera dodatkową adhezyjną warstwę gumy rdzeniowej pomiędzy tkaniną, a okładkami zewnętrznymi powoduje to, że guma wnika w szczeliny tkaniny (Subba Rao, 2021). Taśmy dwuprzekładkowe posiadające rdzeń złożony z dwóch przekładek tkaninowych złączonych elastomerową warstwą. Taśmy wieloprzekładkowe posiadają wysokie parametry wytrzymałościowe (Antoniak, 2007), pomiędzy którymi znajduje się dodatkowa warstwa międzyprzekładkowa zapewniająca odporność na rozwarstwienie, oraz poprawia wytrzymałość na uderzenia poprzez rozpraszanie sił uderzenia (Subba Rao, 2021).

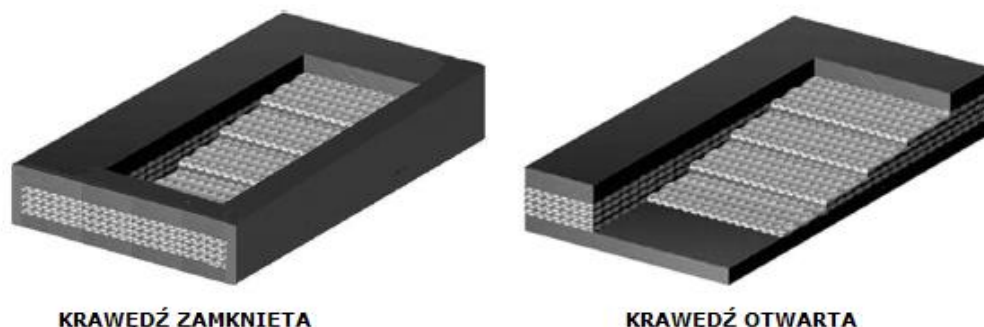


Rys. 3.9. Taśma tekstylna (Subba Rao, 2021)

Warstwy międzyprzekładkowe są warstwami elastomerowymi utrzymywane pomiędzy okładkami, a przekładkami oraz pomiędzy przekładkami w taśmie. Poddawane są procesowi wulkanizacji na gorąco, w wyniku którego tworzy się połączenie i powstaje taśma tekstylna. Warstwa gumy rdzeniowej ma znaczący wpływ na wewnętrzne przyleganie taśmy i odporność na uderzenia, oraz odgrywa rolę w określaniu właściwości wytrzymałościowych taśmy. Niewłaściwa grubość warstwy gumy międzyprzekładkowej (rys. 3.9) może negatywnie wpłynąć na właściwości taśmy oraz prowadzić do oddzielania się warstw lub uszkodzenia na styku bębna przenośnika (Subba Rao, 2021).

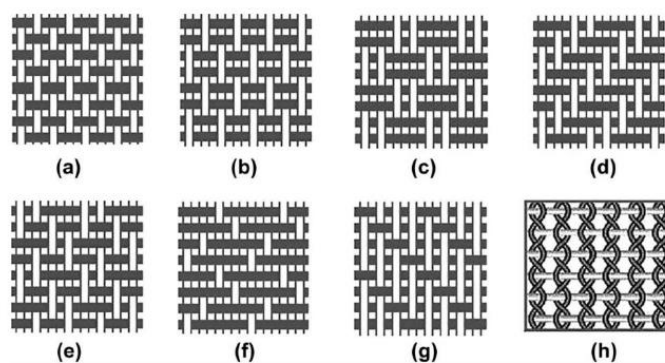
Przekładka ochronna (ang. *breaker*) to dodatkowa poprzeczna warstwa tkaniny, może być wykonane z tych tego samego rodzaju włókien, co przekładka taśmy (rys. 3.9) stosowana przede wszystkim w celu ochrony i zwiększenia przyczepności między okładką a przekładką. Tkanina warstwy ochronnej zwiększa sztywność poprzeczną, ma tendencję do rozpraszania energii uderzenia, zapobiega przebiciu rdzenia taśmy i procesowi przecięcia. Jest umieszczana zazwyczaj pomiędzy okładką nośną a przekładką. Znajduje zastosowanie w taśmach narażonych na ciężkie warunki pracy, pomagających amortyzować naprężenia pochodzące od uderzanie w trakcie załadunku grudkowatych materiałów (Subba Rao, 2021).

Taśmy tekstylne można podzielić ze względu na ukazane na rys. 3.10 odsłoniętą – ciętą oraz zamkniętą krawędź boczną, osłonięcie krawędzi zabezpiecza rdzeń przed oddziaływaniem czynników zewnętrznych (Subba Rao, 2021).



Rys. 3.10. Krawędzie taśm (Subba Rao, 2021)

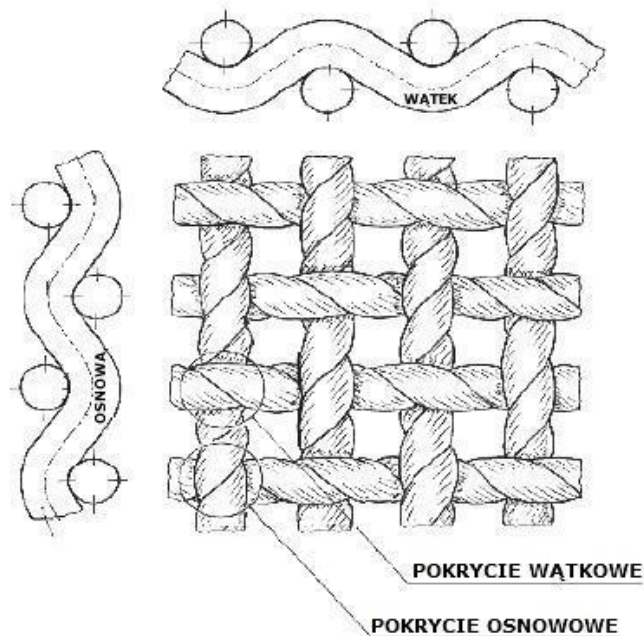
Taśmy wykonane z tkanin tekstylnych są często stosowanymi taśmami w przenośnikach. Zazwyczaj rdzenie są zbudowane z jednej lub większej ilości warstw tkaniny. Główne typy (rys. 3.11) stosowanych wzorów splotów to płócienny, z prostą osnowa oraz jednolity. Tekstylna przekładka taśmy posiada właściwości sprężyste przy rozciąganiu, zawiera dodatkowe wewnętrzne naprężenia wynikające z warunków geometrycznych przenośnika oraz odkształcenia wywołane przez przenoszony na taśmie przenośnikowej materiał. W wyniku tych właściwości rdzeń taśmy ulega wydłużeniu podczas eksploatacji w wyniku zmian wartości naprężenia, co jest spowodowane zmianami warunków pracy jak rozruch i hamowanie lub temperatury. Wartości odkształcenia okładek oraz tkaniny będą różne, wydłużenie procentowe podczas uszkodzenia taśmy np. zerwania będzie miało znacznie większą wartość niż podczas normalnej eksploatacji i może wynosić 400%-500% dla okładek, podczas gdy wydłużenie procentowe tkaniny zawiera się w zakresie od 1% do 4% przy naprężeniu znamionowym. Rozciągnięcie taśmy przenośnikowej można podzielić na trzy rodzaje. 1) Wydłużenie sprężyste które występuje podczas rozruchu, przyspieszenia, opóźnienia, zahamowania oraz obciążenia taśmy. 2) Wydłużenie konstrukcyjne wynikające z rodzaju splotu tkaniny, w mniejszym stopniu z zastosowanego materiału włókienniczego. W typowej tkaninie, zagniecione nitki osnowy mają tendencję do prostowania się podczas przykładania obciążenia, w efekcie następuje przyrost długości taśmy, której pewnej wartości nie można powrotnie odzyskać. 3) Wydłużenie trwałe zawiera zmiany długości spowodowane wydłużeniem podstawowej struktury włókien osnowy oraz część wydłużenia sprężystego i konstrukcyjnego. Wydłużenia plastyczne, trwałe na długości można niwelować przez systemy napinające (Subba Rao, 2021).



Rys. 3.11. Sploty tekstylnych taśm przenośnikowych (Subba Rao, 2021)

- a) płócienny, b) żeberkowy, c) koszykowy, d) skośny wzmocniony,
- e) płócienny „crowfoot”, f) satynowy, g) satynowy „crowfoot”, h) gazejski

Tkanina znajdująca się wewnątrz taśmy składa się z włókien (rys. 3.12), które są zazwyczaj utkane pod kątem prostym, te ułożone wzdłuż, równoległe do przenośnika to przędze osnowowy, ich zadaniem jest przenoszenie naprężeń. Przędze poprzeczne nazywane są wątkowymi lub wypełnieniami, odpowiadają za odporności na uderzenia i stabilności tkaniny (Subba Rao, 2021). Skrzyżowania dwóch nitek nazywa się pokryciem osnowowym, gdy na wierzchu jest osnowa lub pokryciem wątkowym, gdy na wierzchu jest wątek tkaniny (Szosland, 2007).



Rys. 3.12. Tkanina o splotcie płóciennym (Szosland, 2007)

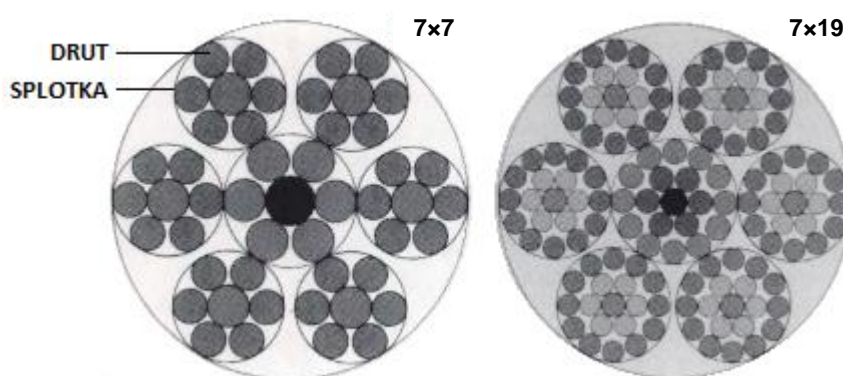
Stosowane zazwyczaj włókna tkanin taśm to nylon, poliester, bawełna, sztuczny jedwab, stal, kevlar, azbest i szkło. Tkanina może być wykonana z jednego rodzaju lub kombinacji włókien, tak aby osiągnąć założone właściwości, często wysypujące układy osnowy oraz wątku takie jak:

- poliester – nylon (poliester osnowa, nylon wątek),
- tkanina bawełniana (bawełna osnowa, bawełna wątek),
- bawełna – nylon (bawełna osnowa, nylon wątek),
- nylon – nylon (nylon osnowa, nylon wątek).

Taśmy przenośnikowe z tekstylnym rdzeniem jedno jak i wielowarstwowe mają szerokie zastosowanie w wyniku możliwości zmiany ich właściwości fizyko chemicznych, zaczynając od zmianę rodzaju materiału poszczególnych nici osnowy kończąc na zmiennie ich ułożenia (Subba Rao, 2021).

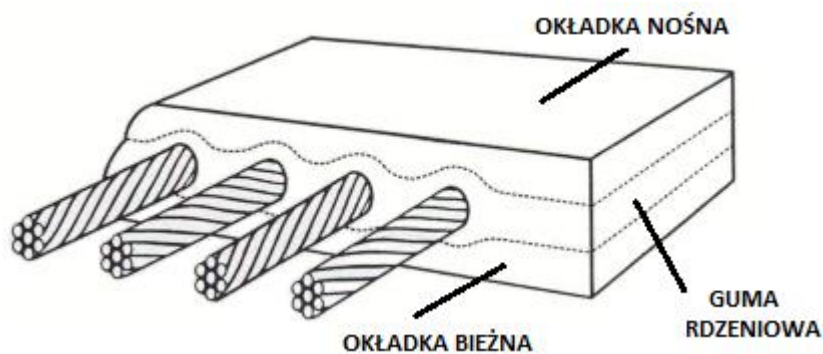
3.2.2. Taśma przenośnikowa z rdzeniem stalowym

Taśma przenośnika wewnątrz posiada wewnątrz równoległe ułożoną pojedynczą warstwę kolejno układanych prawo i lewo skrętnych linek. Rdzeń taśmy zawiera zawulkanizowane w gumie stalowe linki zazwyczaj wykonane ze stali wysokowęglowej. W celu uzyskania odpowiedniego połączenie pomiędzy drutami liny i guma modyfikuje się powierzchnię drutu poprawiające kontakt pomiędzy łączonymi powierzchniami, zmniejszając postępowanie korozji w czasie eksploatacji. Głównie stosowane rodzaje splotów to 7×7 wykorzystywany przy niższych wartościach naprężenia oraz 7×19 który jest stosowany do bardziej obciążanych taśm, umożliwią całkowite przeniknięcie gumy do środka rdzenia zabezpieczając przed korozją. Lina, schematycznie ukazana na rys. 3.13 posiadająca splot 7×7 oraz 7×19 jest zbudowana z siedmiu linek o splotcie 1×7 , lub odpowiednio 1×19 , których kierunek skrętu jest przeciwny do skrętu gotowej liny, połączone linki tworzą ostateczny splot (Fayed i in., 1996).



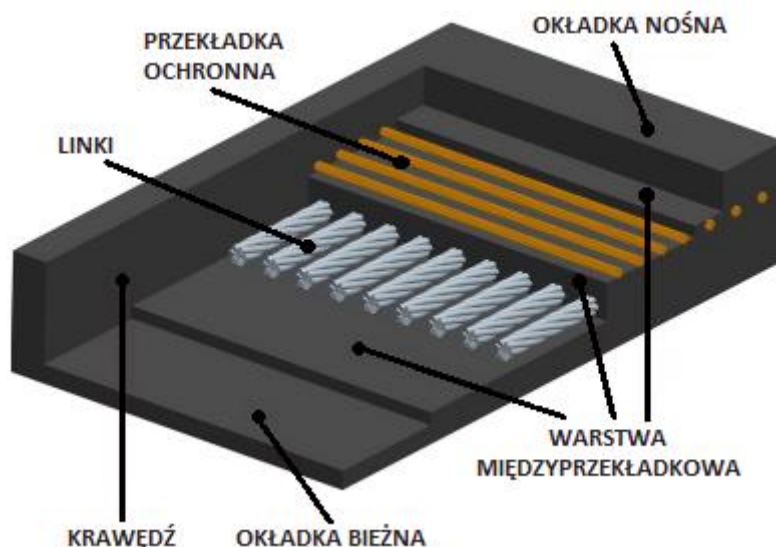
Rys. 3.13. Sploty lin (Fayed i in., 1996)

Taśma przenośnikowa (rys. 3.14) zawiera formowaną krawędź boczną oraz jedną warstwę równoległe zawulkanizowane i przeciwnie skręcone do siebie linki, w celu uniknięcia naprężeń powodujących skręcanie się taśmy oraz utrudnia prowadzenia na bębnach i rolkach przenośnika.



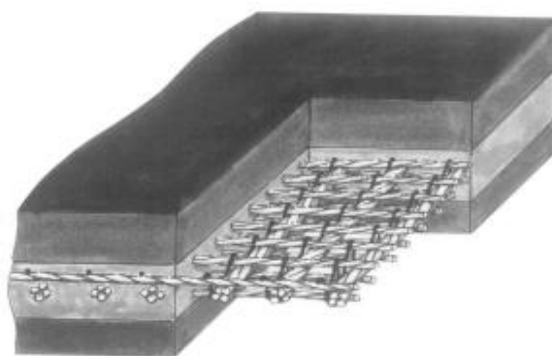
Rys. 3.14. Taśma z rdzeniem z lin (Fayed i in., 1996)

Rdzeń z linek pozwala na duże odkształcenia taśmy, jednak jest podatny na uszkodzenia mechaniczne, przekładki ochronne są używane jako zabezpieczenie rdzenia oraz zwiększają właściwości nośne taśmy. Występują różne modyfikacje warstw zabezpieczających np. dodatkowa przekładka z tkaniny, z jej ukośnymi warstwami lub z poprzeczną warstw drutów nad lub nad i pod rdzeniem (rys. 3.15), oraz wzmocnionymi warstwami tekstylnymi lub siatki z linek stalowych tylko po jednej lub obydwu stronach rdzenia.



Rys. 3.15. Taśma z przekładkami ochronnymi (Fedorko, i in., 2016)

Taśmy posiadające rdzeń z linek cechują się możliwością przenoszenia znacznych obciążeń rzędu 300 kg/cm szerokości, wytrzymują duże naprężenia eksploatacyjne oraz charakteryzują się wysoką wytrzymałością na uderzenia, zmęczeniową i odpornością na wstrząsy w wyniku dobrego połączenia linek z gumą rdzeniową. Taśmy z rdzeniem z linek są produkowane w znacznie większych długościach jednostkowych niż ma to miejsce w przypadku rdzenia tekstylnego pozwalając na zmniejszenie ilości głowic napędowych. Charakteryzują się niską wartością wydłużenia 0,1-0,2 %, ograniczoną podatnością do falowania taśmy oraz sprawdzają się w miejscach, gdzie droga nawijania taśmy jest utrudniona. Występują również bardziej złożone rdzenie taśm, w których elementem przenoszącym obciążenia jest warstwa stalowej siatki (rys. 3.16), posiadają wysoką odporność temperaturową oraz na uderzenia. Siatka charakteryzuje się wysoką przyczepnością zapewniając bardzo dobrą wytrzymałość zmęczeniową taśmy. Mała rozciągliwość taśmy oraz zwiększona elastyczność wzdłużna i poprzeczna umożliwiają zastosowanie tego typu taśm w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych (Subba Rao, 2021).



Rys. 3.16. Rdzeń taśmy z siatką z linek stalowych (Katalog Taśmy..., 2023)

Rdzenie taśm przenośnikowych wykonane z linek charakteryzują się odpornością na zmęczenie zginaniem oraz wstrząsy, wytrzymują znacznie większe obciążenie eksploatacyjne niż taśmy tkaninowe. Rozwiązania konstrukcyjne zawierają osłonięty rdzeń na bocznych krawędziach taśmy powodując, że proces wykonania jest bardziej złożony, jednak chroni przed dostępem środowiska zewnętrznego oraz podnosi odporność na zużycie. Taśmy z rdzeniem stalowym dobrze sprawdzają się w przenośnikach, gdzie dla zapobiegania wypadku przeniesionego materiału stosowany tor ma kształt niecki (Subba Rao, 2021).

3.2.3. Okładki taśm przenośnikowych

Górna część taśmy przenośnikowej nazywana jest, okładką nośną, okładką górną lub bieżnikiem górnym, z kolei warstwa dolna to okładka bieżna, bieżnik dolny lub okładka dolna. Okładki taśmy wykonane są jako mieszanki gumowe lub gumo podobne, są produkowane przez zmieszanie gumy lub elastomerów z odpowiednimi substancjami chemicznymi w celu uzyskania pożądanych właściwości fizyko chemicznych niezbędnych w warunkach eksploatacji. Okładki chronią osnowę taśmy w trakcie przenoszenia materiału, stanowią barierę chroniącą przed uderzeniami materiału mającego tendencje do żłobienia taśmy. Odpowiedni materiał na bieżniki pozwala eksploatować taśmę przenośnika i zapewnia ochronę przed ścieraniem oraz wpływem środowiska zewnętrznego np. wilgocią, promieniowaniem, czynnikami chemicznymi, stanowią osłonę temperaturową osnowy. Okładki w porównaniu do rdzenia nie przenoszą dużych sił rozciągając, jednak mają dużą zdolność do wydłużenia i mogą powrócić do pierwotnego kształtu po odkształceniu.

Popularne elastomery używane do produkcji bieżników taśm to kauczuk naturalny oraz syntetyczny, akrylonitrylo-butadienowy, etylenowo-propylenowy, etylenowo-propylenowo-dienowy, chloroprenowy, nitylo-chloroprenowy i inne. Wybór odpowiedniego rodzaju elastomeru wpływa na wynikowe właściwości taśmy przenośnika np. odporność temperaturową lub zużycie ściernie, dzięki temu zapewnia zdolność do przenoszenia materiału w określonych warunkach. Zużywaniem się okładki górnej postępuje przede wszystkim w wyniku ścierania oraz uderzenia materiału na która jest narażona. Dolna okładka podlega zużyciu głównie na skutek kontaktu ciernego z bębniami przenośnika. Inne czynniki dotyczące obydwu stron okładek to zużycie zmęczeniowe które np. będzie zależęć od długości przenośnika i częstotliwości z jaka przechodzi przez bębny przenośnika lub karbów występujących w strukturze, oraz środowiskowe np. duża wilgotność lub niska temperatura.

Tab. 3.5. Parametry klas okładek taśm przenośnikowych (Antoniak, 2007)

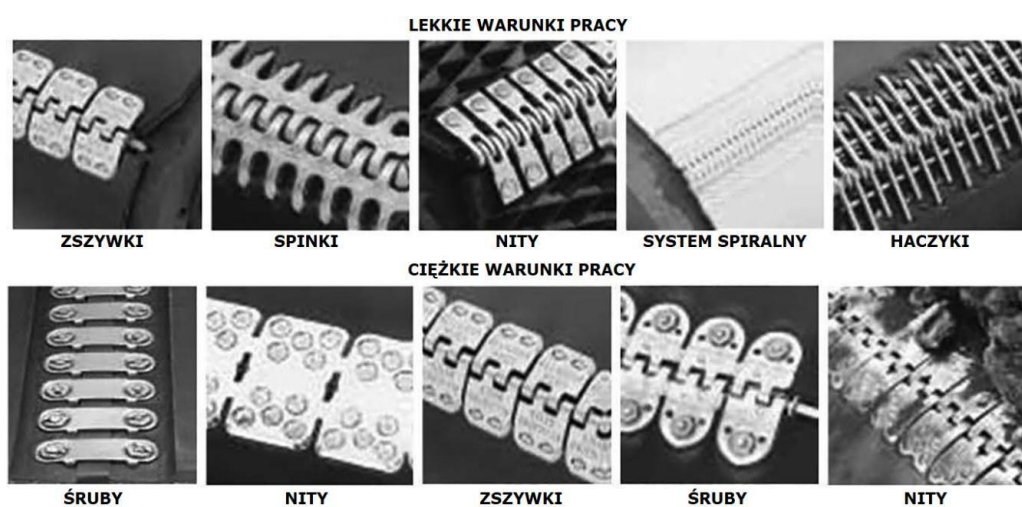
Klasa okładki	Min. wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Min. wydłużenie przy zerwaniu ε [%]	Max. utrata objętości w wyniku ścierania ΔV [mm ³]
ISO-L	15	350	200
ISO-H	24	450	120
ISO-D	18	400	100

Okładki na taśmy przenośnikowe podlegają klasyfikacji (tab. 3.5) według normy PN-EN ISO 14890:2013-06, w której zostały wyróżnione kombinacje głównych cech charakterystycznych okładek oraz podział na kategorie: H – odporności na cięcie i żłobienie, na takie narażone są taśmy transportujące ostre i silnie ściernie materiały np. rudy metali. D – odporność na warunki bardzo silnego ścierania oraz L – praca w warunkach umiarkowanego ścierania np. przenoszenie ostrego piasku lub popiołu. Okładki przenośnika taśmowego, aby wytrzymać stopniowe zużycie oraz chronić rdzeń przed uszkodzeniami mechanicznymi muszą mieć odpowiednią grubość. Grubość okładek taśm zależy od warunków w jakich pracuje taśma oraz tym co jest na niej przewożone, zazwyczaj grubość okładki bieżnej to 40% do 60% okładki górnej lub w przypadku taśm o rdzeniu z linek stalowych grubość okładki dolnej musi wynosić minimum 4 mm, a grubość to 60%-100% grubości okładki górnej. Bieżnik górny będzie z reguły grubszy niż dolny, ponieważ obciążenia eksploatacyjne oraz zużycie są znacznie większe na powierzchni przenoszącej materiał (Subba Rao, 2021).

Kolejnym newralgicznym miejscem taśmy przenośnika będącym karbem geometrycznym jest miejsce łączenia końców taśmy, zastosowanie znajdują trzy metody łączenia:

Połączenia elementami mechanicznymi

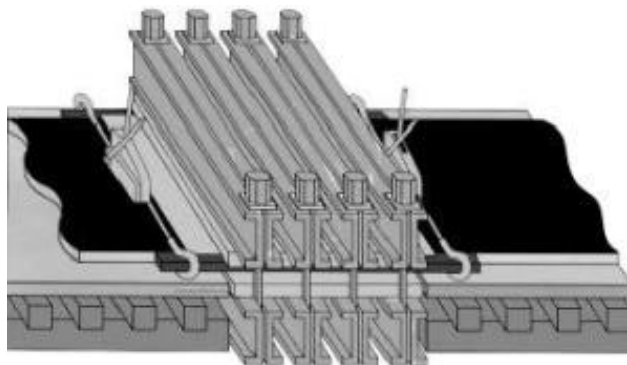
W metodzie łączenia elementami mechanicznymi (rys. 3.17) końce taśmy po zbliżeniu do siebie są łączone za pomocą łączników mechanicznych zawiasowych rozłącznych lub sztywnych nierozłącznych, z różnymi metodami mocowania np. śrubami lub przy pomocy nitów (Subba Rao, 2021). Połączenie ma mniejszą wytrzymałość niż taśma jednak musi ono wynosić minimum sześćdziesiąt procent wartości wytrzymałości taśmy na zerwanie, znajduje zastosowanie do wykonania napraw uszkodzonej taśmy (Antoniak, 2007). Łączenie taśm za pomocą łączników mechanicznych jest stosunkowo ekonomiczną i prostą do wykonania metodą łączenia taśm przenośnikowych, jednak taśmy z rdzeniem z linkami nie mogą być łączone przy pomocy połączeń mechanicznych (Subba Rao, 2021).



Rys. 3.17. Połączenia mechaniczne (Subba Rao, 2021)

Wulkanizacja na gorąco

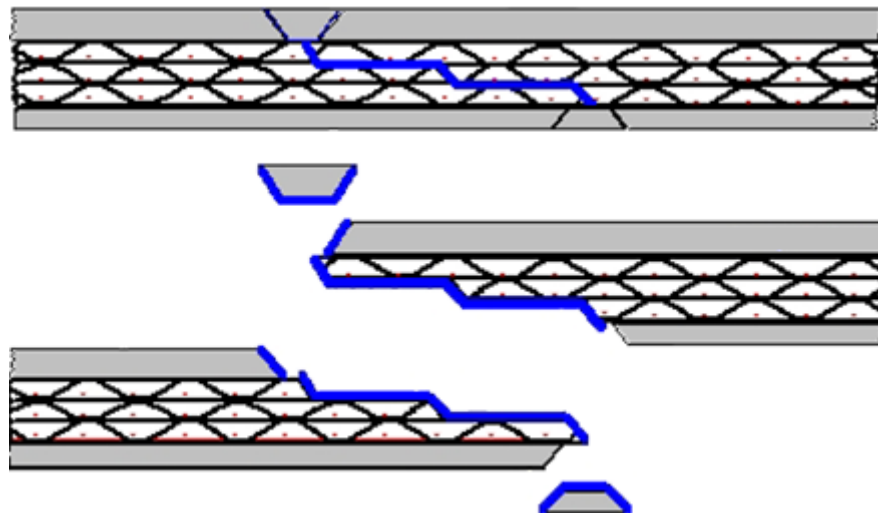
Wulkanizacja umożliwia łącznie wszystkich typów taśm przenośnikowych jest złożonym procesem wymagającym stosowania pras wulkanizacyjnych. Proces, przedstawiony schematycznie na rys. 3.18 odbywa się w podwyższonej temperaturze ok. 150°C oraz zwiększonym ciśnieniu, umożliwia uzyskanie gładkiego jednolitego połączenia z wytrzymałością dochodząca do nominalnej wartości wytrzymałości taśmy na zerwanie. Metoda wymaga rygorystycznych warunków technologicznych procesu, kontroluje się wartości i rozkład siły nacisku prasy oraz czas i temperaturę (Antoniak, 2007).



Rys. 3.18. Proces wulkanizacji (Łączenie taśm..., 2023)

Wulkanizacja na zimno

Proces wulkanizacji na zimno – klejenia (rys. 3.19) ma zastosowania do łączeni taśm z rdzeniem tekstylnym, ale nie znajduje zastosowania do łączenia taśm z linkami stalowymi (Antoniak, 2007). Łączenie nie wymaga docisku prasy, zamiast tego stosuje się dedykowany klej (Subba Rao, 2021). Złącze charakteryzuje taką samą geometrią, jak przy wulkanizacji, stosowane złącza to: zakładkowe, nakładkowe, palcowe (Antoniak, 2007). Proces łączenia zachodzi w temperaturze zależnej od stosowanego kleju, zazwyczaj aktualnej temperaturze otoczenia (Subba Rao, 2021). W trakcie wykonywania połączenia musi być ono chronione przed zanieczyszczeniem pyłami lub wilgocią (Antoniak, 2007).



Rys. 3.19. Proces klejenia (*Metody łączenia...*, 2023)

Połączenia mechaniczne są szeroko stosowane ze względu na łatwość stosowania oraz możliwość używania przenośnych prostych narzędzi, mają niższą wytrzymałość niż klejenie wymagające odpowiedniego przygotowania pierzchni oraz dobrania odpowiednich środków chemicznych do wykonania połączenia. Wulkanizacja jest najbardziej czasochłonnym procesem znajdującym zastosowania do wszystkich typów taśm przenośnikowych zapewniające najwyższe parametry (Subba Rao, 2021).

3.2.4. Rodzaje taśm przenośnikowych

Taśmy przenośnikowe poza głównym podziałem ze względu na rodzaj zastosowanego rdzenia: tekstylny oraz stalowy (Antoniak, 2007), mogą być również charakteryzowane ze względu na przeznaczenie, w tab.3 zostało przedstawione kilka używanych typów taśm (Subba Rao, 2021).

Tab. 3.6. Stosowane taśmy przenośnikowe (Subba Rao, 2021)

Rodzaj Taśmy	Charakterystyka
Gumowe	Odpowiednie do przenoszenia większości materiałów ściernych, posiadające mieszanek gumy naturalnej i syntetycznej.
Odporne na przecięcia	Odporne na przecięcia mają wysoką zawartość gumy naturalnej, zalecane do pracy w trudnych warunkach.
Żaroodporne	Z dodatkiem styrenu-butadienu, do materiałów o temperaturze do 1200°C lub chlorobutyłu do przenoszenia materiałów o temperaturze do 1700°C.
Ognioodporne	Zawierają neopren w wielowarstwowej konstrukcji osnowy, spełniają rygorystyczne standardy bezpieczeństwa w kopalniach podziemnych.
Do przemysłu drzewnego	Niebarwiące, opracowane dla przemysłu drzewnego są odporne na oleje oraz żywicę.
PVC	Z dodatkiem poliestru i nylonu, odporne na uderzenia, rozdarcie oraz ścieranie. Spełniają wymagania normy odnośnie do ognioodporności.
Do przemysłu spożywczego	Wykonane z nietoksycznych materiałów odpornych na oleje, tłuszcze i przebarwienia.
PVC pokryte nitylem	Do zastosowania w kopalniach, gdzie istnieje niebezpieczeństwo pożaru, odporne na oleje, ścieranie i wysoką temperaturę.
Z rdzeniem stalowym	Stosowane w przenośnikach długodystansowych, wysokie parametry wytrzymałościowe.
Ognioodporne z rdzeniem stalowym	Ognioodporne, wysokie parametry wytrzymałościowe, dla przenośników znajdujących się w kopalniach.
Olejoodporne	Z dodatkiem nitylu, neoprenu lub kauczuku syntetycznego, do przenoszenia materiałów zawierających oleje.
Chemoodporne	Do transportu materiałów mogących wchodzić w reakcje z taśmą, wymagany odpowiedni dobór taśmy przenośnikowej.
Antystatyczne	Wykonane w celu zapobiegania elektryczności statycznej do transportu w miejscach, gdzie zachodzi niebezpieczeństwo wybuchu.

3.3. Eksploatacja taśm przenośnikowych

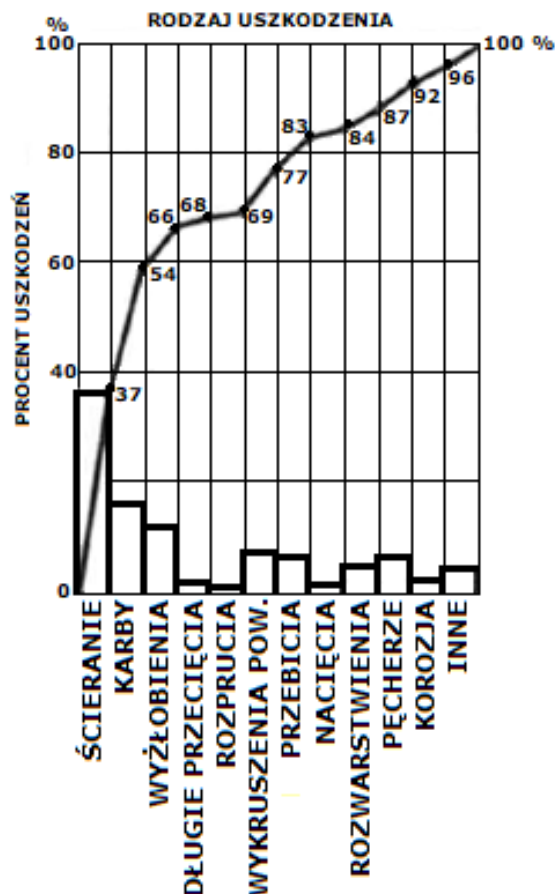
3.3.1. Czynniki ekonomiczne

Wymagające warunki, w jakich muszą pracować przenośniki taśmowe, rosnące ceny materiałów wykorzystywanych w budowie i eksploatacji przenośników powodują stały wzrost kosztów transportu, dlatego standardem stają się działania które mogą zapewnić maksymalny czas poprawnej pracy ograniczając koszty (Lutyński, 1989).

Właściwe wykorzystanie potencjału taśm przenośnikowych jest jednym z czynników, który zalicza się do poprawy efektywności transportu. Wiele czynników, takich jak: odpowiedni dobór taśmy do przenośnika, możliwa modernizacja konstrukcji przenośnika skutkują zwiększeniem trwałości taśm. Rosnący popyt na surowce mineralne pojawiające się nieplanowane przerwy w transporcie materiałów wynikające z awariami taśm mogą spowodować znaczne straty produkcyjne, często niemożliwe do zredukowania podczas ciągłej całodobowej pracy przez siedem dni w tygodniu (Błażej i in., 2022). Z tego powodu konieczne jest gromadzenie informacji o procesie degradacji materiału taśmy przenośnika w celu przedłużenia czasu jego bezawaryjnej pracy (Fedorko, 2021).

Awaryjne wymiany taśm generują znacznie wyższe koszty niż wcześniej zaplanowanych prewencyjnych wymian, dlatego też próby zapobiegania awariom są racjonalne ekonomicznie. Zauważalne efekty redukcji kosztów oraz zwiększenia poziomu niezawodności przenośnika taśmowego może przynieść właściwa eksploatacja taśm oraz podejmowanie poprawnych decyzji organizacyjnych dotyczących ich gospodarki. W wyniku zmiennej intensywności pracy przenośnika oraz losowo pojawiającym się uszkodzeniem taśmy, kalendarzowa ocena czasu pracy nie jest obiektywną miarą stopnia zużycia. Możliwość pozyskania informacji o stanie taśmy oraz predykcja pozostałego czasu poprawnej pracy są kluczowe (Błażej i in., 2022).

Taśmy można użytkować do chwili ich naturalnego zużycia lub zniszczenia. Wykres 3.20 przedstawia dane dotyczące uszkodzeń taśm, największy udział wszystkich przypadków powodujących wymianę taśmy na nową było wytarcie jej bieżników oraz karby (Lutyński, 1989). W trakcie współpracy elementów następuje zużycie tribologiczne materiałów np. na skutek ścierania, pęknięcia i kruszenia cząstek materiału, lub adhezji powierzchni współpracującego elementu czy też reakcji trybochemicznych zachodzących na powierzchniach tarcia (Jóźwik i in., 2020). Przecięcia wzdłużne lub przebiccia są przyczyną znacznej części wszystkich zniszczeń taśm przenośnikowych powodujących konieczność jej demontażu (Hardygóra i in., 2011). Zużyte w wyniku eksploatacji bieżniki taśmy oraz obrzeża osłaniające rdzeń mogą być ponownie nakładane. W wielu przypadkach rdzeń taśmy po przeprowadzonej regeneracji może być ponownie wykorzystany, a uszkodzenia skutecznie naprawione, zmniejszając koszty eksploatacji (Lutyński, 1989).

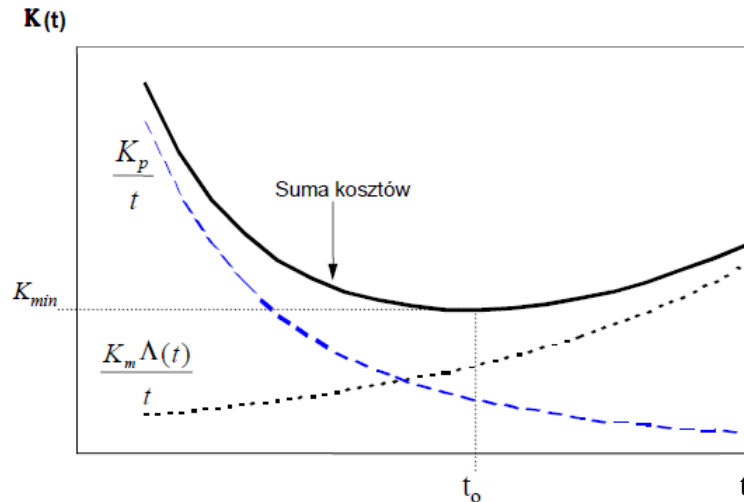


Rys. 3.20. Przyczyny powodujące wymianę taśmy na nową (Lutyński, 1989)

Taśmy przenośnikowe podlegają również prewencyjnym wymianom w celu poddania ich regeneracji, a następnie ponownego użycia. Systemy diagnostyczne stanu taśmy są bardzo efektywnym narzędziem do oszacowania optymalnego czasu profilaktycznej wymiany w celu regeneracji oraz uniknięcia kosztownych awarii. W wyniku otrzymania informacji o stopniu zużycia taśmy można podjąć zaradcze działania naprawcze pozwalające wydłużyć okres użytkowania taśm oraz oszacować pozostały czas bezawaryjnej eksploatacji w założonej strategii wymian (Błażej i in., 2022). Istotnym elementem zawierającym się w całym czasie właściwego wykorzystania taśmy jest poprawnie przeprowadzony proces regeneracji. Przyjmuje się, że regenerowana taśma może być zastosowana ponownie bez ograniczeń oraz posiada walory użytkowe zbliżone do nowej taśmy. Odpowiednio wczesne wykrycie uszkodzeń oraz metoda kwalifikacji taśmy do zabiegu regeneracji przy użyciu właściwej technologii, personelu oraz narzędzi umożliwia wykonanie procesu przywracając taśmie walory eksploatacyjne. Zazwyczaj regenerowane dwa lub trzykrotnie taśmy ostatecznie podlegają wymianie (Jurdziak i in., 2020). Zaplanowanie postojów przenośnika na czas wykonania naprawy oraz wymiany części pozwala na optymalną gospodarkę budżetem taśmowym. Jednak należy mieć na uwadze, że straty produkcyjne mogą być również spowodowane czasem oczekiwania na nową taśmę, stąd znajomość terminów kolejnych wymian umożliwia zamawianie taśmy z odpowiednim wyprzedzeniem (Błażej i in., 2022). Istnieją różne modele pozwalające na wyznaczanie ekonomicznie optymalnego czasu wymiany taśmy przenośnikowej w czasie jego eksploatacji. Taki model może być np. oparty o analizę zmiany kosztów zakupu oraz naprawy taśmy na przenośniku i może brać pod uwagę sumę dwóch składników (Jurdziak i in., 2020):

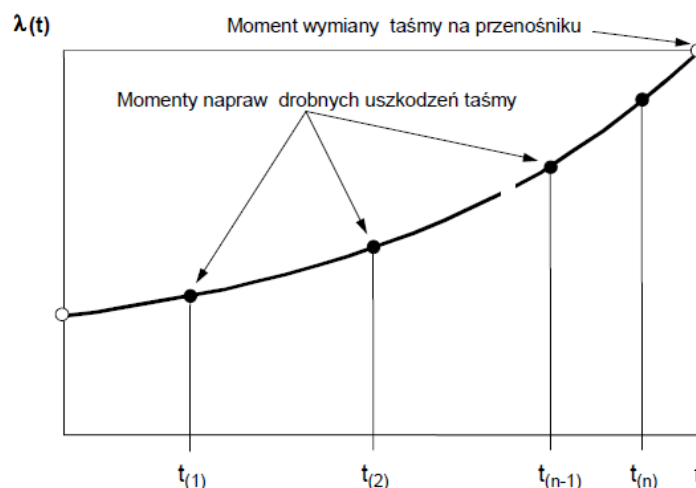
$$K(t) = \frac{K_p + K_m \Lambda(t)}{t}, \quad (3.6)$$

gdzie: K_p – koszt demontażu starej taśmy oraz zakupu i instalacji nowej, przy założeniu, że są one niezależne od czasu oraz koszt $\frac{K_p}{t}$ jest stale malejący, K_m – średni koszt naprawy taśmy wykonanej na przenośniku [zł], $\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t)dt$ – oczekiwana liczba drobnych napraw taśmy na przenośniku od momentu jej założenie do czasu t .



Rys. 3.21. Model zmiany składników kosztów, pozwalający wyznaczyć optymalny moment wymiany (Jurdziak, 2000)

Ze względu na fakt, że intensywność pojawiania się uszkodzeń taśmy wymagających napraw na przenośniku $\lambda(t)$ jest funkcją rosnącą (rys. 3.21), koszt naprawy na jednostkę czasu $\frac{K_m \Lambda(t)}{t}$ jest rosnący. Wykonywane tzw. drobne naprawy są drożnym środkiem pozwalającym na dalszą eksploatację taśmy, przywrócenie funkcjonalności taśmy do stanu jak sprzed uszkodzenia nie wpływa znacząco na poprawienie właściwości całej taśmy, ponieważ stan całej pętli taśmy ulega pogorszeniu (rys. 3.22) wraz z czasem.



Rys. 3.22. Intensywność uszkodzeń taśmy z drobnymi naprawami (Jurdziak, 2000)

Opierając się na teoretycznym rozkładzie Weibulla o parametrach α i β czasu pracy t do naprawialnego uszkodzenia, intensywność pojawiania się uszkodzeń przyjmie postać (Jurdziak i in., 2020):

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (3.7)$$

natomiast optymalny czas wymiany taśmy wyraz wzór:

$$t_0 = \beta^\alpha \sqrt{\frac{K_p}{(\alpha-1)K_m}} \quad (3.8)$$

Gdy taśma jest monitorowana pod kątem uszkodzeń, zebrane dane pomiarowe umożliwiają rzeczywiste zidentyfikowanie funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$. Inne podejście pozwala na wyznaczenie optymalnego czasu wymiany taśmy t_0 w oparciu o zmiany kosztów powiązanych ze stanem taśmy, przyjmuje się, że koszt obsługi taśmy αK_m na metr bieżący zmienia się w funkcji kwadratowej. Uwzględniając koszty inspekcji oraz diagnostyki $K_c + \alpha K_m t$ taśmy w podejmowanie decyzji o wymianach w optymalnym momencie, pozwala zbierać dane statystyczne o czasach pracy taśmy do wymiany i umożliwia określenia rozkładu czasu pracy do chwili wymiany w celu regeneracji, inaczej niż zostało to opisane w podejściu pierwszym. Wzór lepiej opisujący optymalny czas wymiany taśmy oraz koszty związane z naprawami, które są powiązane ze stanem uszkodzenia (Jurdziak i in., 2020):

$$t_0 = \sqrt{\frac{K_p + K_c}{\alpha K_m}} \quad (3.9)$$

Gdy jest brany pod uwagę proces regeneracji wymaga to, by stan taśmy był na tyle dobry, aby zastosowane zabiegi miały szansę powodzenia na przywrócenie taśmy do stanu zdatności. W takim przypadku taśmę należy zdjąć wcześniej niż w przypadku występowania zagrożeń, natomiast moment jest wcześniejszy niż eksploatacja do całkowitego zużycia. Nierówność przedstawia kolejność takich momentów (Jurdziak i in., 2020):

$$t_{0 \text{ regeneracja}} < t_{0 \text{ zagrożenia}} < t_{\text{całkowite zużycie}} \quad (3.10)$$

Modele umożliwiają szacowanie jednostkowych kosztów eksploatacji oraz pozwalają wskazać teoretyczne czasy pracy przenośników, pomiędzy którymi należy wymieniać taśmy, jednak decyzje o wymianie są podejmowane po zastosowaniu odpowiedniej diagnostyki, i są dokonywane w oparciu o stan techniczny taśmy. Diagnostyka taśm jest bardzo istotnym elementem dotyczącym eksploatacji przenośników, pozwala na identyfikację funkcji potrzebnych do dalszego szacowania optymalnych czasów oraz określania kosztów inspekcji. Umożliwia wykrycie uszkodzeń na etapie, w którym jest opłacalne ich naprawianie, pomaga w podejmowanie decyzji o wymianach lub naprawach taśmy w optymalnym momencie (Jurdziak i in., 2020).

3.3.2. Bezpieczeństwo

Przenośniki taśmowe podobnie jak innego rodzaju urządzenia łańcucha logistycznego mogą stwarzać zagrożenia dla operatorów oraz osób pracujących w ich pobliżu. Zarówno elementy mechaniczne przenośnika jak układ napędowy lub przeniesienia napędu także taśma mogą stwarzać zagrożenie w momencie, gdy wyniku eksploatacji ulegają uszkodzeniu (Živanić i in., 2021).

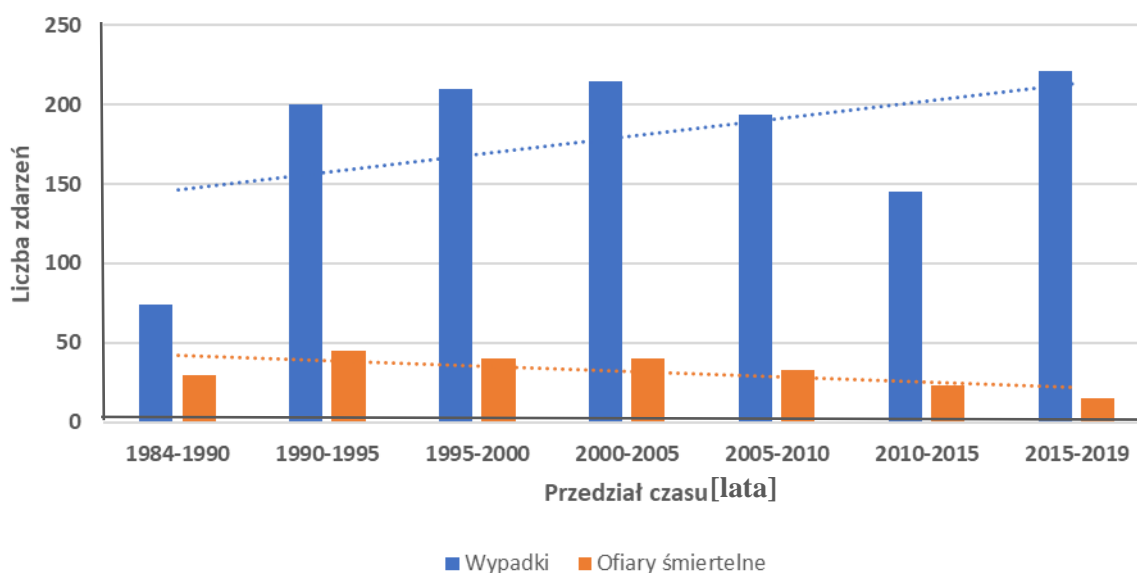
Taśmom przenośnikowym są stawiane wysokie wymagania bezpieczeństwa, które były powodem tragicznych wypadków w przeszłości. Przyjmuje się, że można dopuścić taśmę do eksploatacji, gdy są spełnione wymagania obowiązujących norm i przepisów, oraz stosowane są zasady i środki ograniczenia ryzyka (Hardygóra i in., 2014). Bardzo ważne staje się jak najwcześniejsze wykrycie niezgodności w chwili, gdy przenośnik znajduje się w stanie bezpośrednio przed wystąpieniem uszkodzenia niszczącego taśmę, stąd monitorowanie ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo pracy.

Zebrane w tab. 3.7 dane wskazują, że pomimo wzrostu liczby wszystkich wypadków (rys. 3.23) liczba ofiar śmiertelnych spada. Ma to związek ze zwiększającym się zapotrzebowaniem

sektora przemysłowego na maszyny do transportu oraz ciągłym rozwojem metod pozwalających na zachowanie wysokiego stopnia bezpieczeństwa i higieny pracy (Živanić i in., 2021).

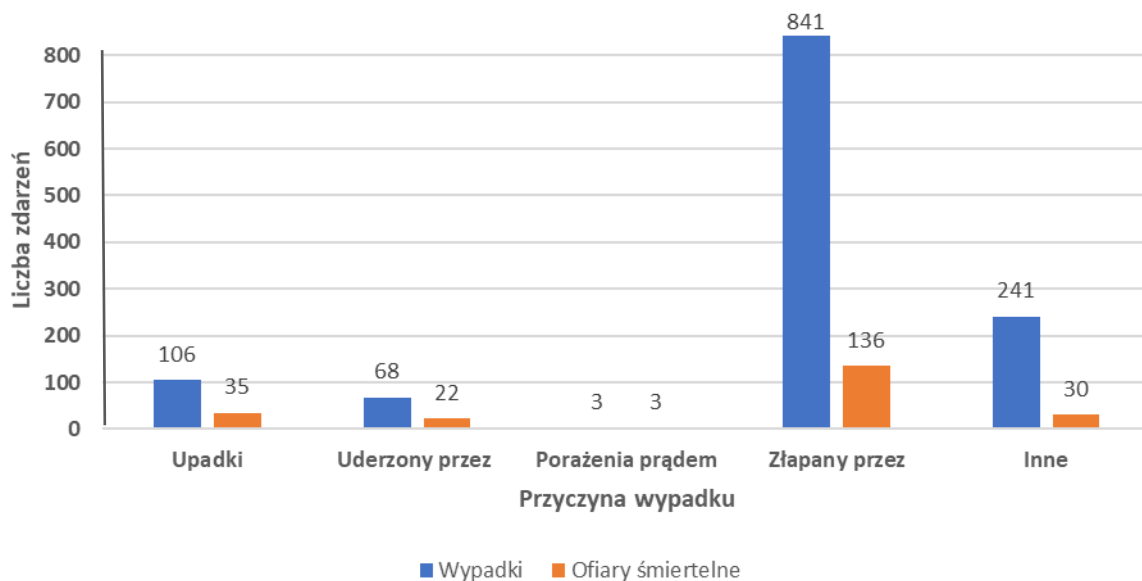
Tab. 3.7. Liczba wypadków i ofiar śmiertelnych (Živanić i in., 2021)

Przedział	Wypadki	Ofiary śmiertelne	Śmiertelność [%]
1984-1990	74	30	41
1990-1995	200	45	23
1995-2000	210	40	19
2000-2005	215	40	19
2005-2010	194	33	17
2010-2015	145	23	16
2015-2019	221	15	7
Razem	1259	226	-



Rys. 3.23. Zestawienie wypadków i ofiar śmiertelnych na przestrzeni lat (Živanić i in., 2021)

Taśma jako główny ruchomy element przenośnika wielokrotnie ma bezpośredni kontakt z osobami, które pracują w pobliżu, a jej stan ma bezpośredni wpływ na jakość i bezpieczeństwo pracy użytkowników. Pojawiające się na powierzchni taśmy uszkodzenia, takie jak wyłobienia lub przebiccia, mogą być bezpośrednim czynnikiem całkowitego zerwania taśmy, a tym samym stwarzać ogromne niebezpieczeństwo narażając na ciężki uszczerbek na zdrowiu lub utratę życia. Monitorowanie stanu taśmy przenośnikowej ma ogromne znaczenie ze względu na możliwość wczesnego wykrywania uszkodzeń oraz uniknięcia awarii generującej znaczne koszty i nieplanowany przestój oraz bezpieczeństwo użytkowników. Zebrane dane (rys. 3.24) wyraźnie wskazują, że największy udział wśród przyczyn zarówno, jeśli chodzi o wypadki jak i ofiary śmiertelne ma złapanie przez ruchomy element przenośnika (Živanić i in., 2021).



Rys. 3.24. Zestawienie wypadków i ofiar śmiertelnych na przestrzeni lat (Živanić i in., 2021)

Konsekwencjami dla osób poszkodowanych jest utrata zdrowia (tab. 3.8) lub życia bardzo często pojawiają się amputacje części lub całych kończyn, rany szarpane, urazy kręgosłupów, twarzy, złamania kości, uszkodzenia mięśni lub zgony (Živanić i in. 2021).

Tab. 3.8. Rodzaj uszkodzenia w wyniku wypadku (Živanić i in., 2021)

Rodzaj uszkodzenia	Ilość
Amputacja	336
Kontuzja	50
Rozcięcie	137
Złamanie	340
Inne	396

Dane z wypadków tylko w polskim sektorze górnictwa podziemnego związane z eksploatacją przenośników taśmowych w latach 2004-2014 wskazują na śmierć 23 osób oraz 15 górników doznało ciężko uszczerbku na zdrowiu, w tym amputacji kończyn (*Dane z wypadków...*, 2023).

W przypadku przenośników taśmowych głównym powodem łączącym poszczególne przyczyny rodzaju uszkodzenia jest wciągnięcie odzieży lub części ciała w ruchomą część urządzenia, które odbywa się podczas sprawdzania stanu technicznego lub czyszczenia poszczególnych elementów z resztek transportowanego materiału podczas pracy przenośnika oraz utrzymania ciągłego przepływu materiału, lub związane z sortowaniem i pakowaniem w otoczeniu przenośnika oraz inne czynności związane z produkcją. Pomimo zmniejszania się liczby ofiar przy przenośnikach taśmowych fakt, że mają one miejsce jest powodem, dla którego wszelkie możliwości monitorowania powinny być stosowane. Systemy umożliwiające wczesne wykrywanie uszkodzeń taśmy, które mogą zapobiec trwałemu uszczerbkowi na zdrowiu lub śmierci powinny być wdrażane w przedsiębiorstwach. Zapewnienie środków ochrony dla ludzi przebywających w obszarze pracy przenośników jest kwestią kluczową, a monitorowanie głównego ruchomego elementu przenośnika, jakim jest taśma, może zapewnić wykrywanie uszkodzeń na początkowym etapie powstawania. W ten sposób zostaje zapewniona nie tylko bezpieczna praca ludzi, ale też możliwość wykonania opłacalnej naprawy (Živanić i in., 2021).

3.4. Systemy do monitorowania pracy taśm przenośnikowych

Przenośniki taśmowe są newralgicznymi elementami łańcucha dostaw transportu bliskiego w przedsiębiorstwach je wykorzystujących. Nieplanowane przestoje w wyniku awarii, naprawy i ponowne uruchomienie prowadzą do wysokich strat finansowych przedsiębiorstwa. Dlatego też przedsiębiorstwa chętnie inwestują w urządzenia monitorujące pracę przenośników taśmowych. Prognozuje się, że wydatki na te cele w 2024 r. na rynku światowym wyniosą ok. 250 mld USD (Kirjanów-Błażej i in., 2023).

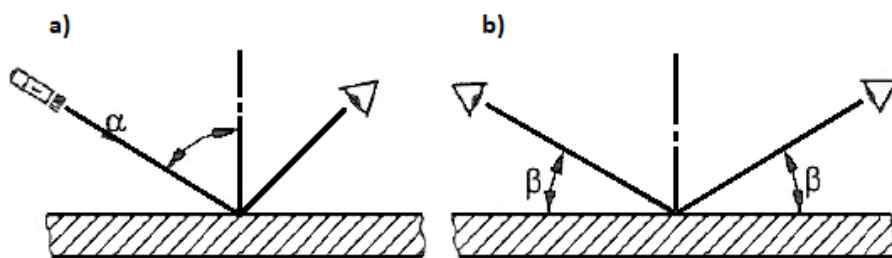
W celu ograniczenia możliwych zatrzymań wprowadza się urządzenia i systemy monitorujące poszczególne elementy przenośników, począwszy od elementów napędowych, takich jak silniki i motoreduktory oraz ich składowych, np. łożysk i kół zębatych, kończąc na elementach napędzanych w postaci taśm przenośnikowych. Pojawiające się uszkodzenia w taśmach takie jak pęknięcia czy rozwarstwienia przez zjawisko zmęczenia lub proces korozji linek stalowych i ich ubytek przekroju nośnego w przypadku taśm zbrojonych są naturalnym procesem zachodzącym w wyniku ich eksploatacji. Ponadto występują deformacje w ułożeniu drutów, a także nacięcia lub odkształcenia plastyczne w trakcie transportowania danego materiału lub medium. Występujące wady (PN EN ISO 9000:2015), zanim spowodują awarię i zatrzymanie pracy przenośnika, mogą być monitorowane okresowo lub w trybie ciągłym przy pomocy różnych systemów. Monitorowanie pozwala na wykrycie uszkodzeń we wczesnym etapie propagacji oraz podjęcie stosownych działań naprawczych i konserwujących.

Konieczność prowadzenia badań aktualnego stanu oraz właściwości mechanicznych taśm jest determinowana przez szeroki zakres zastosowań przenośników taśmowych, a także rozwój materiałów konstrukcyjnych oraz algorytmów i metod obliczeniowych. Pośród właściwości mechanicznych taśm przenośnikowych istotne znaczenie ma wytrzymałość na rozciąganie w kierunku wzdłużnym i poprzecznym, wydłużenie trwałe i sprężyste, sztywność wzdłużną oraz poprzeczną, odporność na rozwarstwienie przekładek oraz przebicie rdzenia i taśmy, a także wpływ karbu na wytrzymałość taśmy. Prędkość rozchodzenia się drgań wzdłużnych w taśmie, właściwości reologiczne oraz współczynnik tłumienia można przyporządkować do grupy dynamicznych właściwości mechanicznych taśm przenośnikowych.

Badania nieniszczące to najbardziej popularna grupa badań stosowana do badania taśm przenośnikowych, pozwalająca na monitorowanie ich pracy w czasie rzeczywistym (Kirjanów-Błażej i in., 2020). W przypadku badania samej taśmy, pozwalają one na sprawdzanie przede wszystkim stanu powierzchni oraz wewnętrznej struktury taśmy, określając stan poszczególnych warstw i adhezji między nimi (Fedorko, 2021). Do tej grupy należą metody optyczne, akustyczne (w tym ultradźwiękowe), elektromagnetyczne, magnetyczne, radiograficzne (rentgenowskie), termograficzne, a także tensometryczne.

3.4.1. Zastosowanie metod optycznych

Badanie wizualne umożliwia wykrycie powierzchniowych nieciągłości materiałowych. Pozwalają kontrolować elementy wykonane z wielu różnych materiałów oraz wykrywać pęknięcia pomimo ich niewielkich rozmiarów. Podstawowa klasyfikacja badań wizualnych dzieli je na badania bezpośrednie, która są wykonywane nieuzbrojonym okiem lub przy pomocy układów powiększających do 20×. Badania pośrednie pozwalają na badanie niedostępnych powierzchni, są badania optycznymi wykonywanymi przy pomocy np.: wideoskopów, endoskopów i innych. Kontrola elementów jest wykonywana zarówno na etapie wytwarzania oraz eksploatacji. Rysunek 3.25 przedstawia optymalne warunki identyfikacji nieciągłości materiałowych, które uzyskiwane są, gdy kąt padania wiązki światła α zawiera się w przedziale $45^\circ - 85^\circ$ do kierunku prostej normalnej, oraz podczas obserwacji z odległości do 600 mm, natomiast kąt widzenia β wynosi co najmniej 30° (Lewińska-Romicka, 2001).



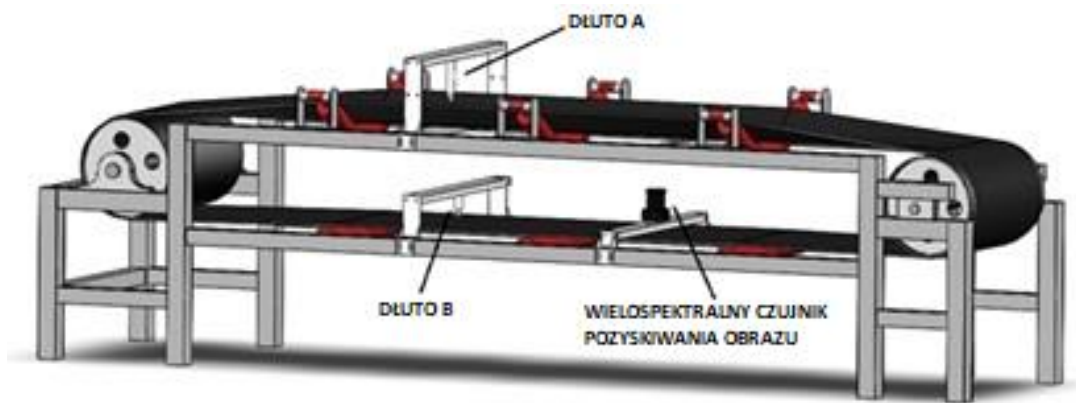
Rys. 3.25. Warunki wykrywania nieciągłości (Lewińska-Romicka, 2001)

Badania wizualne są podstawową metodą pozwalającą na wykrycie niezgodności powierzchniowych oraz mają ograniczone zastosowanie ze względu na możliwość wykonania badań przy zatrzymanym prędośniku. Metoda ta jest obciążona dużym błędem, wynikającym np. z nieodpowiedniego natężenia oświetlenia i kąta obserwacji danej niezgodności oraz braku możliwości wykrycia wad wewnętrznych nie wychodzących na powierzchnię zewnętrzną taśmy prędośnikowej. Urządzenia wspomagające np. w postaci kamery (rys. 3.26) niwelują pewne ograniczenia, jednak zazwyczaj są łączone z innymi elementami całego systemu pomiarowego (Chamorro i in., 2022).



Rys. 3.26. System wykorzystujący kamerę (Chamorro i in., 2022)

Multispektralna metoda detekcji wizualnej przedstawiona schematycznie na rys. 3.27 polega na rejestrowaniu obrazów w świetle widzialnym, średniej i dalekiej podczerwieni przy wykorzystaniu dedykowanego multispektralnego czujnika akwizycji obrazu (Hou i in., 2019).



Rys. 3.27. System detekcji (Hou i in., 2019)

Multispektralna metoda ma zastosowanie do wykrywania wad powierzchniowych, takich jak pęknięcia czy rozdarcia taśmy. Cały proces detekcji jest podzielony na pięć części, ukazanych schematycznie na rys. 3.28: akwizycja obrazu, fuzja obrazu, przetwarzanie obrazu, ekstrakcja cech oraz analiza stanu. W etapie pozyskiwania obrazu używa się czujnika akwizycji obrazu, działającego w różnych zakresach, począwszy od światła widzialnego i kończąc na podczerwieni. Następnie ma miejsce etap fuzji obrazu, czyli łączenie obrazów widzialnych i średniej podczerwieni oraz obrazów widzialnych i dalekiej podczerwieni. Następnie proces przetwarzania obrazu zapewnia poprawę jakości oraz segmentację obrazu uzyskanego po dokonaniu połączenia obrazów. Kolejnym krokiem jest ekstrakcji cech, w którym są wyodrębniane informacje o stanie taśmy przenośnika. Ostatnim etapem jest analiza aktualnego stanu taśmy przenośnika w wyniku połączenia podwójnie połączonych obrazów.



Rys. 3.28. Schemat wielospektralnej metody detekcji wizualnej (Hou i in., 2019)

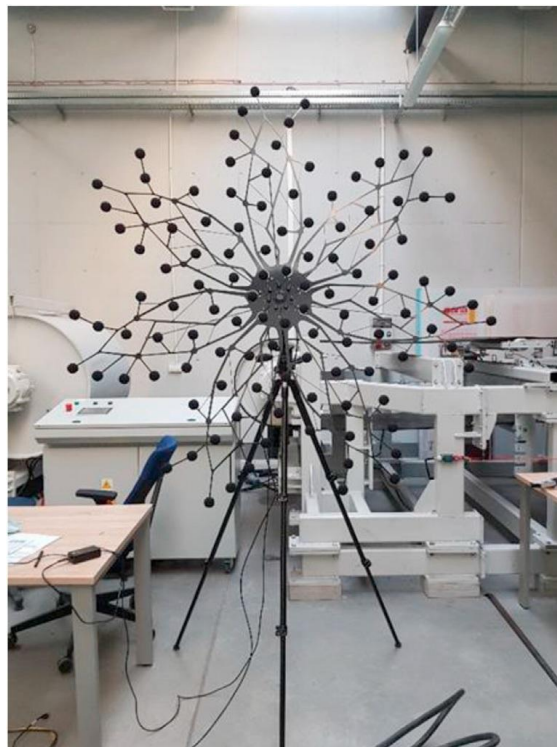
Wykorzystując przemysłową kamerę CCD oraz Gigabit Ethernet, Yang z zespołem (2014) zbudował system wizji maszynowej do monitorowania pracy taśmy przenośnika. System wykazał zdolność do wykrywania zarówno pęknięć wzdłużnych, jak i odchyień taśmy na rolkach. Autorzy utworzyli również algorytm, który na podstawie pozyskanych dwójkowych obrazów taśmy pozwalał na detekcję uszkodzeń i przesunięć taśmy.

Badania są prowadzone również w kierunku wykorzystania laserów do wykrywania uszkodzeń wzdłużnych (Li i in., 2018). Za pomocą metod analizy obrazu autorzy (Lv i in., 2021) uzyskiwali dane o stanie taśmy, przekształcając wzdłużne cechy geometryczne, związane z uszkodzeniem, na cechy liniowe. Do wyznaczenia parametrów wzdłużnych uszkodzeń zastosowano innowacyjną metodę IGGM (ang. *improved gray-gravity center method*), która pozwoliła na identyfikację uszkodzenia w warunkach laboratoryjnych z dokładnością 99,74% w czasie 48,81 ms.

3.4.2. Badanie emisji akustycznej

Po uzyskaniu spektrum częstotliwości emitowanych dźwięków za pomocą oprogramowania NoiseImage można zidentyfikować krytyczne częstotliwości (Fedorko i in., 2018). Na podstawie dominujących lub znaczących częstotliwości lub pasm można utworzyć akustyczne obrazy lub filmy. Zbierając dane za pomocą mikrofonów Array star, można wygenerować wizualizację dokładnie umiejscawiającą częstotliwości od ok. 100 Hz do 13 kHz. Akustyczne obrazy mogą być tworzone też dla całego zakresu częstotliwości, dając integralną informację o źródle dźwięku. Kiedy natomiast obraz jest generowany dla określonej częstotliwości lub pasma, pola dźwiękowe są ukazywane w miejscach odpowiednich elementów systemu inżynierskiego, emitującego dane dźwięki (Fedorko i in., 2018).

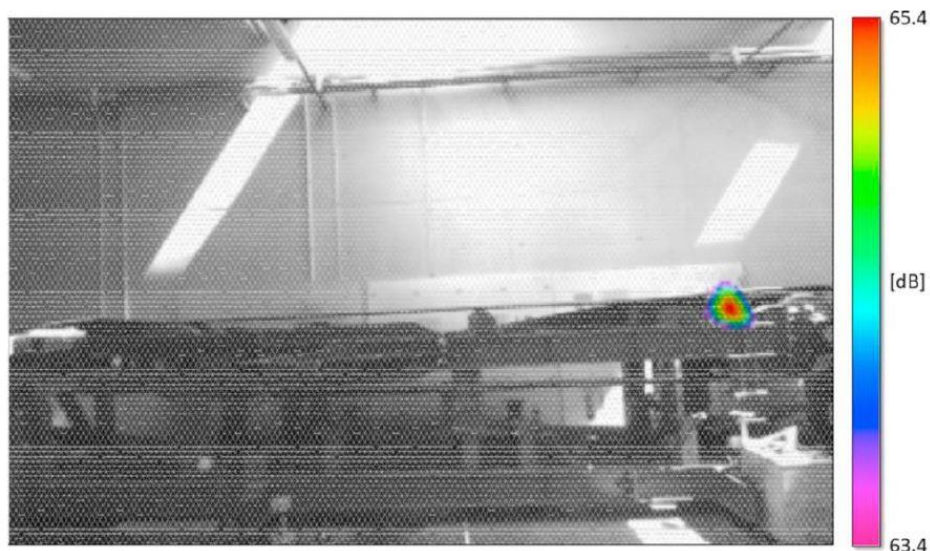
Kamera akustyczna ukazana na rys. 3.29 pozwalana na wykonanie badania przez identyfikację przestrzennego źródła dźwięku oraz analizę źródeł hałasu (Bortnowski i in., 2020).



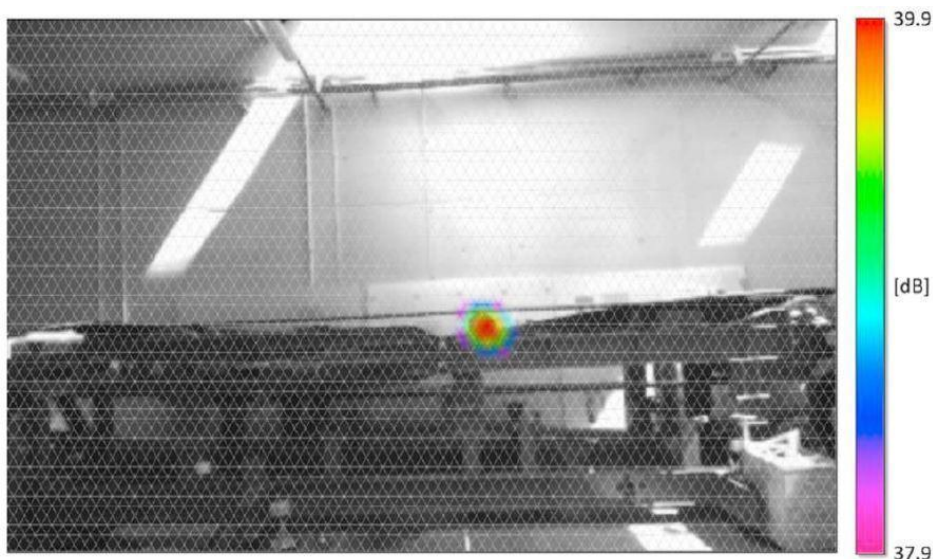
Rys. 3.29. Kamera akustyczna (Bortnowski i in., 2020)

Rejestrowanie poziomu ciśnienia akustycznego obszaru przenośnika taśmowego znajdującego się w zakresie pomiarowym. Zarejestrowany, odpowiednio przetworzony i zinterpretowany sygnał umożliwia badanie źródeł dźwięku w interesującym nas obszarze o określonej częstotliwości. Metoda pozwala rejestrować widma o różnych składowych częstotliwości, np. podstawowe, harmoniczne, wysokoczęstotliwościowe.

Możliwa też jest interpretacja ich pochodzenia, np. generowanie szumu przez pracujący silnik, pochodzącego od częstotliwości napięcia zasilającego lub hałas wynikający z ruchu poszczególnych części układu napędowego. Jak zostało przedstawione na rys. 2.4, źródła hałasu mogącego wskazywać na uszkodzenia, są dobrze identyfikowalne. Istotnym ograniczeniem jest brak możliwości analizy szumu przy częstotliwościach o bardzo niskich wartościach (Bortnowski i in., 2020).



Rys. 3.30. Wizualizacja hałasu silnika (Bortnowski i in., 2020)



Rys.3.31. Wizualizacja hałasu rolki prowadzącej (Bortnowski i in., 2020)

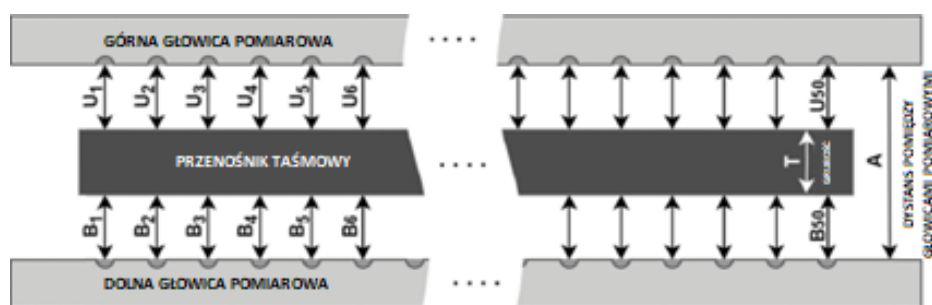
Rejestrowany zakres hałasu emitowanego przez współpracujące ze sobą elementy może być powiązany z ich aktualnym stanem technicznym. Może też powstawać w wyniku dużej różnicy prędkości kątowych pomiędzy silnikiem i przekładnią a pozostałymi elementami przenośnika. Przy wykorzystaniu kamery należy zwrócić uwagę na częstotliwości o wysokiej amplitudzie i zidentyfikować zakres niskich częstotliwości, w którym będą występować sygnały powiązane z tarciami współpracujących elementów. Metoda pozwala zidentyfikować źródła hałasu: silnik (rys. 3.30), rolki (rys. 3.31), niewspółosiowa praca taśmy, poszczególne elementy przenośnika. Można też wykryć pisk generowany przez ślizgający się pas (Bortnowski i in., 2020).

Inny system oparty na monitorowaniu emisji akustycznej zaproponował Wang z zespołem (Wang i in., 2022). Jego celem było wczesne wykrycie wzdłużnego uszkodzenia taśmy, któremu towarzyszy charakterystyczny dźwięk. Za pomocą algorytmów wyodrębniających zadaną cechę (ang. *feature extraction*) i algorytmów maszynowego uczenia (ang. *machine learning*, ML) autorzy wykazali skuteczność identyfikacji uszkodzenia na poziomie 95% w czasie 21,6 ms.

3.4.3. Pomiary ultradźwiękowe

Pomiary ultradźwiękowe są zaliczane do metod badań objętościowych (Lewińska-Romicka, 2001), polegają na wykorzystaniu zjawisk towarzyszących wytwarzaniu oraz rozchodzeniu się drgań mechanicznych o ponaddźwiękowej częstotliwości (Deputat, 1980). Umożliwiają wykrycie nieciągłości materiałowych, szczególnie wewnętrznych, ale również podpowierzchniowych i powierzchniowych np. wąskoszczelinowych lub płaskich, w zależności od rodzajów stosowanych fal. Metoda badania polega na wprowadzeniu fal ultradźwiękowych w wyniki przesuwania głowicy po powierzchni obiektu, o częstotliwości większej od 20 kHz oraz odczytu sygnałów wywołanych przez przechodzący przez badany element fale. Pośród badań ultradźwiękowych najbardziej rozpowszechnione oraz stosowane są badania defektoskopowe (Deputat, 1980). Badać można różnego rodzaju materiały m.in. wykonanych z metali, tworzyw sztucznych, wyrobów gumowych. Badania ultradźwiękowe znajdują zastosowanie w inspekcji połączeń klejonych, zgrzewanych, nitowanych spawanych, umożliwią lokalizację nieciągłości oraz jej gabaryty (Lewińska-Romicka, 2001), również można je używać do określania zmian mikro struktury materiału na skutek procesu eksploatacji oraz do pomiaru grubości (Deputat, 1980). Podczas badań defektoskopowych do wykrywania nieciągłości stosuje się metody (Lewińska-Romicka, 2001): Echa – polega na odbiciu fali od powierzchni i nieciągłości obiektów, Przepuszczania (lub inaczej cienia) – polega na przesłaniu fal przez nieciągłość, TOFD – polega na wykorzystaniu ugięcia dyfrakcyjnego oraz rozpraszania fal.

Ultradźwiękowy system do ciągłego pomiaru grubości taśmy przenośnika został opracowany na Politechnice Wrocławskiej (Kirjanów-Błażej i in., 2023). Zasada pomiaru jest pokazana na rys. 3.32, gdzie ustawione w szeregu czujniki ultradźwiękowe obejmują pomiarem przesuwającą się taśmę przenośnika.



Rys. 3.32. Głowica ultradźwiękowa (Kirjanów-Błażej i in., 2023)

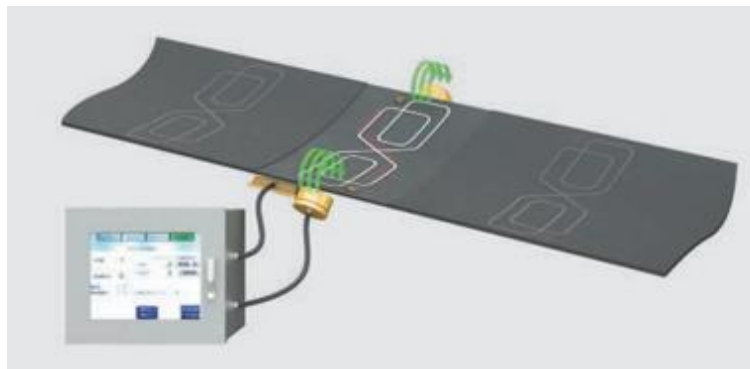
Zaproponowany system pozwala oceniać grubość taśmy w czasie rzeczywistej pracy przenośnika, niezależnie od typu zastosowanej taśmy. Szczególną uwagę autorzy zwracają na konieczność wykonywania poprawnej kalibracji systemu (Kirjanów-Błażej i in., 2023).

Czujnik ultradźwiękowy zastosowano również w badaniach laboratoryjnych przenośników taśmowych typu „sandwich” (Hrabovský et al, 2023). W tym systemie pomiarowym czujnik ultradźwiękowy S18UIA wraz z czujnikiem siły U9C oraz systemem czujników tensometrycznych DS NET dostarcza sygnału, obrabianego przez oprogramowanie DEWESoft X2 SP5, na podstawie którego monitorowana jest siła ściskająca transportowany materiał. Jak zaznaczają autorzy, badane urządzenia są wciąż na etapie testów laboratoryjnych.

Ultradźwiękowy system pomiarowy ma główne zastosowanie do pomiaru ubytków w przekroju taśmy, które zmniejszają jego odporność na przetarcie lub przebicie, zwiększając tym samym możliwość uszkodzenia rdzenia. Przetarcie powierzchni zewnętrznej prowadzące do odsłonięcia struktury wzmacniającej jest jedną z wielu oznak zużycia taśmy przenośnika (*Badania ultradźwiękowe SONOTEC*, 2023).

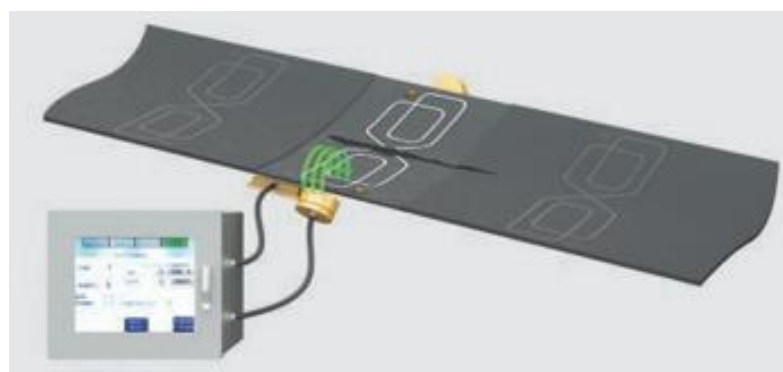
3.4.4. System elektromagnetyczny

CONTI RipProtect to indukcyjny system wykrywania rozdarcia taśmy działający w częstotliwości radiowej RF (ang. *Radio Frequency*), którego zadaniem jest wykrywanie głównie uszkodzeń w postaci wzdłużnych rozdarć taśmy przenośnika, poprzez monitorowanie stanu ciągłości zawulkanizowanych pętli anten przewodów w taśmie (dane katalogowe Conticental). System ten jest technologią opartą na indukcji, w regularnych odstępach monitoruje integralność przewodzących anten pętlowych osadzonych w taśmach przenośnikowych z rdzeni tekstylnym lub rdzeniem stalowym. Podstawowymi elementami układu pomiarowego są: detektor elektromagnetyczny, składający się z głowic, które są instalowane w najbardziej neralgicznych miejscach pracy dla taśmy, czujników składających się z pętli zawulkanizowanych przewodów w taśmie, nadajnika dzięki któremu jest możliwe powstanie prądu indukcyjnego w pętli oraz jednostki sterującej, której zadaniem jest analiza sygnałów (System CONTI RipProtect, 2023).



Rys. 3.33. System monitorujący CONTI RipProtect (Katalog Conticental, 2023)

Jeśli dojdzie do uszkodzenia taśmy rys. 3.34, przewód pętli czujnika jest uszkodzony lub przerwany. Nadajnik nie może indukować prądu elektrycznego w rozerwanej pętli i żaden sygnał nie jest przekazywany do detektora. Jednostka sterująca analizująca zgodność odczytów ze stanem nominalny, gdy wykryje brak sygnału wygeneruje alarm (Katalog Conticental, 2023).



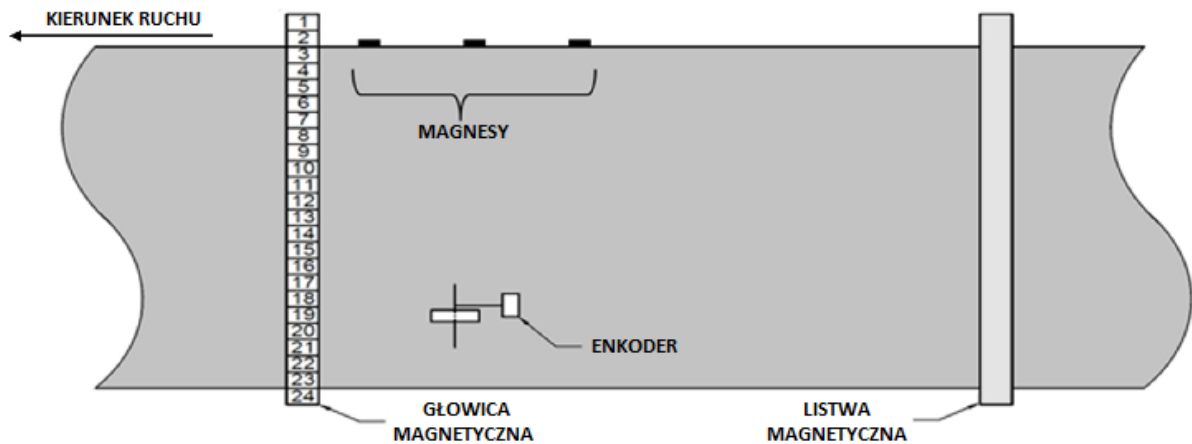
Rys. 3.34. System monitorujący CONTI RipProtect (Katalog Conticental, 2023)

System pomimo szeregu zalet wynikających z możliwości wykrywania uszkodzeń oraz wszechstronności zastosowania, wymaga specjalnych taśm przenośnikowych z wbudowanymi pętlami przewodów, co znacznie podnosi końcowy koszt produkcji taśmy w chwili produkcji oraz wymiany.

3.4.5. System diagnostyki wysokorozdzielczej

System Diagnostyki Wysokorozdzielczej (ang. *High Resolution Diagnostic System, HRDS*) jest przedstawiony na rys. 3.35. System ten służy do badań magnetycznych taśm przenośnikowych z linkami stalowym i opiera się na zmodyfikowanym systemie EyeQ™ (Kozłowski i in., 2020). Jego zasada działania polega na tym, że linki nieuszkodzone generują symetryczną odpowiedź magnetyczną na całej szerokości taśmy, podczas gdy te uszkodzone zakłócają kształt odpowiedzi magnetycznej (Kozłowski i in., 2019). Głównym atutem systemu HRDS jest zwiększenie liczby czujników oraz specjalne urządzenie do akwizycji danych, co przekłada się na zwiększenie rozdzielczości układu pomiarowego i wzmocnienie możliwości pomiarowych.

Główne elementy, tj. głowica magnetyczna oraz listwa magnetyczna, są ustawione prostopadłe do kierunku ruchu taśmy przenośnika. Czujniki w postaci cewek wykrywają zmiany wartości pola magnetycznego, które generowane jest przez namagnesowane stalowe linki zawulkanizowane w rdzeniu taśmy. Zmiany wartości pola magnetycznego wykrywane przez układ pomiarowy zachodzą w pobliżu miejsc uszkodzonych splotów lub stalowych linek (Kozłowski i in., 2020).



Rys. 3.35. Schemat układu pomiarowego HRDS (Kozłowski i in., 2020)

Praca układu pomiarowego polega na wstępnym namagnesowaniu za pomocą pręta magnetycznego stalowych linek w rdzeniu. Następnym etapem jest zebranie danych z głowicy magnetycznej, w której znajdują się 24 cewki w odległości co 10 cm. Umożliwia to wykonywanie pomiarów z rozdzielczością 0,1 m na przenośnikach o maksymalnej szerokości taśmy 2,4 m. Układ HRDS pozwala na badanie taśm przenośnikowych poruszających się z prędkością do 10 m/s. Końcowo zebrane sygnały są poddane synchronizacji przez odpowiedni algorytm oraz analizie, umożliwiając identyfikację niezgodności (Kozłowski i in., 2020).

Metoda pomiarowa jest nastawiona na identyfikowanie specyficznego typ uszkodzeń, tj. rdzenia taśmy z linek stalowych, nie identyfikuje uszkodzeń okładek oraz nie znajduje zastosowania w taśmach z rdzeniem tekstylnym.

3.4.6. Radiograficzny system detekcji

Do metod badań objętościowych należy również metoda radiograficzna, umożliwiająca wykrywanie wewnętrznych i powierzchniowych nieciągłości (Studnik i Król., 2017). Metoda pozwala na identyfikację nieciągłości objętościowych oraz płaskich, które mogą być wykryte, gdy kierunek rozchodzenia się promieniowania jest tożsamy z kierunkiem ułożenia uszkodzenia o odpowiedniej głębokości i szerokości. Zasada defektoskopii radiologicznej polega na naświetlaniu badanego obiektu promieniowaniem jonizującym zazwyczaj rentgenowskim X z lamp lub γ generowanych ze sztucznych źródeł izotopowych, oraz zapisaniu zidentyfikowanych nieciągłości jako cieniowych obrazów w postaci radiogramów (Lewińska-Romicka, 2001). Podczas naświetlania badanego obiektu promieniowaniem, promieniowanie przenika przez materiał. W wyniku zjawisk interferencji i dyfrakcji intensywność i jednorodność rozkładu promieniowania po przejściu jest zróżnicowana, co pozwala na wykrycie wad wewnętrznych (Studnik i Król., 2017).

System CBGuard Life Extender przedstawiony na rys. 3.36 wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie do kompleksowego monitorowania taśmy przenośnika, prowadzi ciągłą analizę stanu taśmy oraz raportuje wyniki w czasie rzeczywistym. Pozwala to na wykrywanie i oznaczanie niezgodności i uszkodzeń wewnętrznych oraz zewnętrznych, obserwowanie stanu łączeń i linek na podstawie zdjęć wykonywanych przy użyciu skanera promieni rentgenowskich.



Rys. 3.36. System CBGuard (System detekcji radiograficznej, 2023)

Integralną częścią systemu jest dedykowane oprogramowanie analizujące aktualny stan taśmy, które ma możliwość porównania jej stanu w odniesieniu do poprzedniego badania (System CBGuard, 2023). Ograniczeniem metody badań radiologicznych jest niemożliwość wykrycia głębokości uszkodzeń oraz trudność wykrycia niezgodności ułożonych prostopadle do kierunku napromieniowania taśmy. System pozwala wykrywać uszkodzenia, które są położone na kierunku rozchodzenia się promieniowania rentgenowskiego (Studnik i Król., 2017).

3.4.7. Metody termograficzne

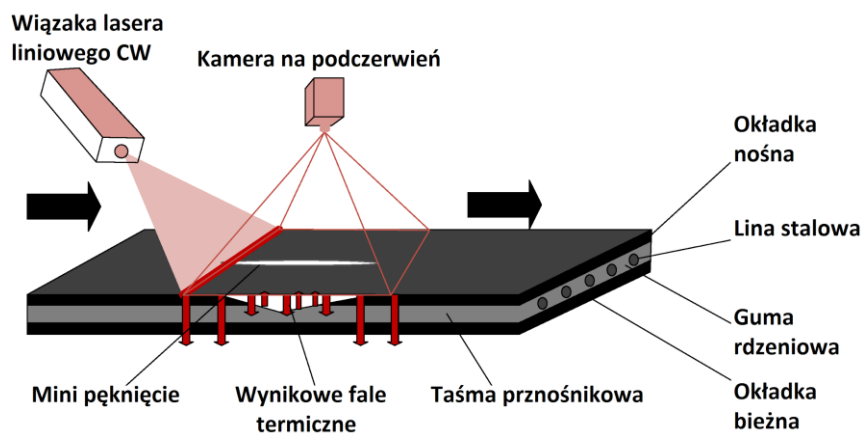
Wczesne wykrycie podłużnych uszkodzeń taśm przenośników jest możliwe za pomocą analizy obrazu termowizyjnego. Kiedy ostra krawędź jakiegoś obcego przedmiotu, który znalazł się w transportowanym ośrodku i uległ zablokowaniu, rozpocznie oddziaływanie na taśmę, w wyniku zwiększonej siły tarcia nastąpi emisja energii cieplnej. Obszar, który jest poddany działaniu sił tarcia, ma podwyższoną temperaturę powierzchni, łatwą do zaobserwowania za pomocą urządzeń termowizyjnych jeszcze zanim nastąpi uszkodzenie wzdłużne taśmy (Yang i in., 2020). Schemat na rys. 3.37 ukazuje procedurę detekcji uszkodzeń tego typu na podstawie promieniowania podczerwonego.



Rys. 3.37. Procedura detekcji termowizyjnej (Yang i in., 2020)

Podobnie obserwacja termograficzna w czasie rzeczywistym łożysk i ich uszczelnień daje możliwość gromadzenia i analizowania stanu pracy przenośnika taśmowego (Pytlik i Trela, 2016).

Termografia aktywna, w odróżnieniu od pasywnej, polega na rejestracji promieniowania podczerwonego, będącego odpowiedzią na zewnętrzne wymuszenie termiczne (Jurek, 2017). System pomiarowy jest oparty na metodzie termografii ze wzbudzeniem laserowym oraz służy do identyfikacji niezgodności taśmy, wykrywania pęknięć na jej powierzchni. Termografia (rys. 3.38) wzbudzona laserem, w porównaniu z metodą termografii pasywnej służącej do zbierania fali termicznej powstającej w procesie nagrzewania tarcowego taśmy przenośnika, nie sprawdza lokalnej charakterystyki nagrzewania wynikającej z tarcia taśmy przenośnika i potrafi wykrywać mini pęknięcia przed pojawieniem się dużego rozdarcia.

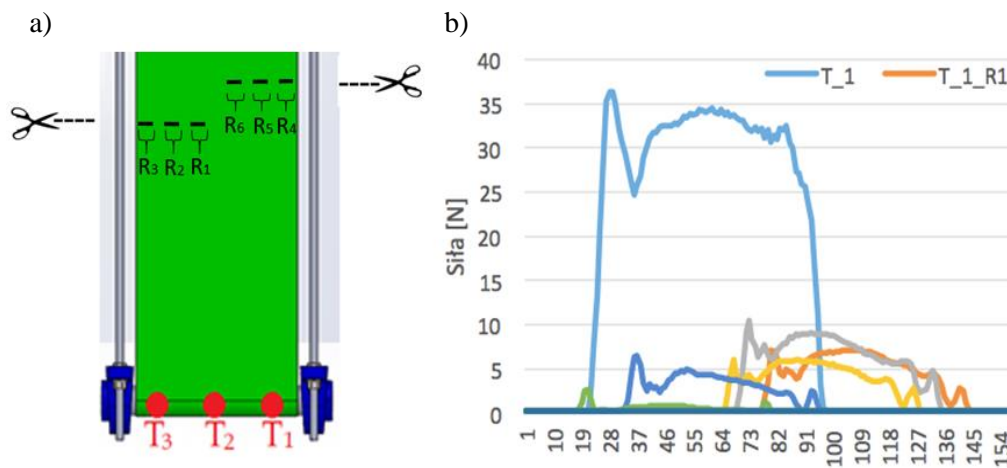


Rys. 3.38. Zasada działania termografii wzbudzonej laserem do wykrywania mini pęknięć taśmy przenośnika (Zeng i in., 2021)

Powierzchnia taśmy jest podgrzewana wiązką laserową, następnie przy pomocy algorytmu wyodrębniony zostaje obraz w celu szybkiego zarejestrowania zmiany temperatury pęknięcia pod wpływem lokalnego nagrzewania laserowego. Cechy obrazu są wyodrębniane oraz łączone przez algorytm obrazowania, który jednocześnie wzmacnia obraz funkcji oparty na sygnałach termicznych dodatkowo ujawniając cechy pęknięć. Ostatecznie segmentacja progowa oraz algorytm transformacji Hougha pozwalają na określenie rozmiaru pęknięć (Zeng i in., 2021).

3.4.8. Tensometryczny system pomiarowy

Rozwiązaniem, inspirującym do utworzenia i zbadania systemu, opisanego w niniejszej rozprawie, jest tensometryczny system pomiarowy rys. 3.41, w którym zostały zastosowane trzy czujniki tensometryczne o średnicy 16 mm, umieszczone na jednym z wałków przENOŚNIKA (Ryba, 2020). Mierzą siłę nacisku i są podłączone do płytki PCB, która jest zamontowana wewnątrz wałka jednocześnie umożliwiając jego obrót. Odbierane dane z czujników są bezprzewodowo przesyłane do komputera umożliwiając ich dalszą analizę.



Rys. 3.39. Schemat rozmieszczenia tensometrów ($\varnothing 16$) oraz wykonanych uszkodzeń i wykres obrazujący spadek naciągu taśmy (Ryba, 2020)

System zbiera dane co 180° obrotu wałka, wynika to z kształtu oraz wielkości zastosowanych czujników tensometrów. Układ pomiarowy pozwala na wykrywanie obciążeń znajdujących się na powierzchni taśm, umożliwia regulację naciągu taśmy przENOŚNIKA oraz w wyniku tego w chwili nacięcia jednej z krawędzi taśmy następuje spadek wartości naciągu, co również zostało przez system wykryte oraz opisane na etapie przeprowadzonych badań. Wadą jest nieciągły wykres pozyskiwanego sygnału oraz uderowy charakter każdorazowego kontaktu tensometru z taśmą (Rucki i in., 2022).

Podsumowanie

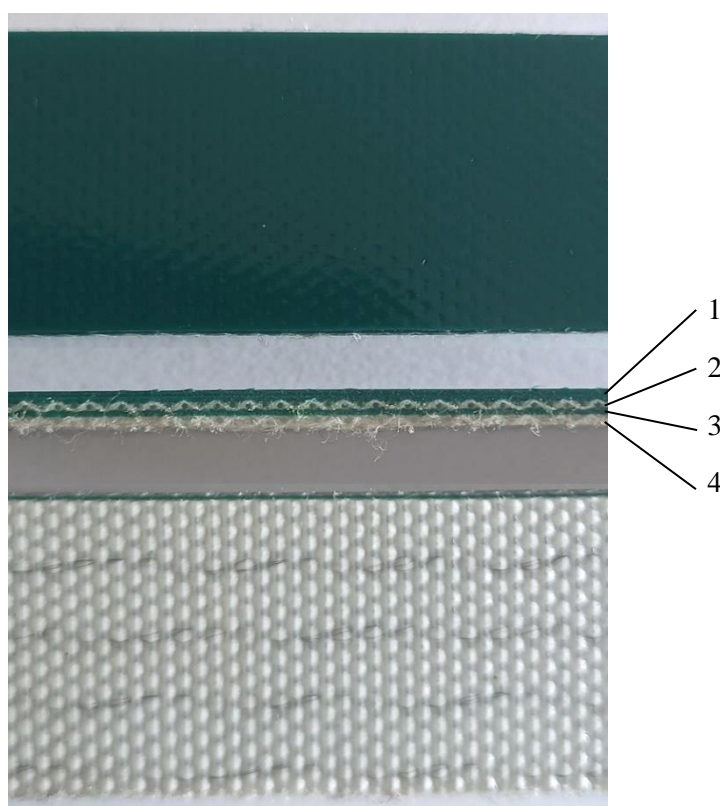
Istnieje wiele metod oceny stanu taśmy eksploatowanej w warunkach przemysłowych, które pozwalają na uzyskanie informacji jakościowych o taśmie. W wyniku takich badań stwierdza się obecność oraz rodzaj uszkodzenia, co pozwala na podjęcie odpowiedniej decyzji odnośnie do dalszej eksploatacji lub naprawy czy wymiany taśmy. Dostarczane dane są kluczowym czynnikiem prognozowania czasu bezpiecznej eksploatacji oraz mają wpływ na technologię i zakres naprawy taśmy w razie takiej konieczności. Zaprezentowane rozwiązania diagnostyki taśm przENOŚNIKOWYCH posiadają szereg zalet, ale również ograniczeń, wynikających z rozwiązań konstrukcyjnych.

Istniejące rozwiązanie nie wyczerpują jednak możliwości detekcji oraz wczesnego wykrywania uszkodzeń tkaninowych taśm przENOŚNIKOWYCH. Poza tym, systemy takie wymagają zastosowania drogich urządzeń, np. specjalnych taśm przENOŚNIKOWYCH z wcześniej zaimplementowanymi czujnikami, głowic lub dodatkowej aparatury. Często zastosowanie opisanych systemów wymaga wcześniejszego planowanego unieruchomienia przENOŚNIKA w celu wykonania badań lub wykrywają tylko pewną część niezgodności, zależnych od kierunku ich występowania oraz procesu prowadzenia badań. Podjęte w niniejszej pracy badania mają na celu utworzenie i zbadanie systemu monitoringu, pozbawionego tych wad.

4. Przedmiot i metodyka badań

4.1. Opis badanej taśmy

Taśma jest niewątpliwie najważniejszym elementem w przenośnikach taśmowych ze względu na realizowaną funkcję oraz koszt (Zarzycki i in., 2017). Do oceny możliwości identyfikacji stanu taśmy przenośnika przy pomocy tensometrycznego systemu pomiarowego zostały użyte dwutkaninowe jednostronne zgrzewane taśmy. Grubość wynosi $t_t = 2$ mm, długość $l = 1875$ mm, szerokość $w = 350$ mm, taśmy posiadają okładki górne oraz warstwę adhezyjną z poli(chloru winylu), natomiast warstwy tkaniny wykonane są z poliestru. Taśma jest pokazana na rys. 4.1, a jej dane techniczne w tabeli 4.1.



Rys. 4.1. Struktura taśmy z rdzeniem tekstylnym (oprac. własne)

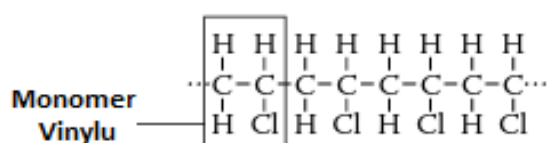
1 – okładka nośna, 2 – przekładka, 3 – warstwa międzyprzekładkowa, 4 – okładka bieżna

Tab. 4.1. Specyfikacja taśmy przenośnikowej Enitra EDV08PB-AS 2.0 (dane producenta)

Dane techniczne	Wartość / Opis
Materiał PVC	Polichlorek winylu
Typ	dwutkaninowa, jednostronna
Siła naciągu na naprężenie wstępne 1%	8 N/mm
Minimalna średnica bębna	30 mm
Temperatura pracy:	-10÷88 °C

Taśmy z PVC znajdują zastosowanie w wielu obszarach przemysłu, występują w górnictwie, produkcji żywności, rolnictwie, obszarze logistyki i magazynowania, sektorze budowlanym, przemyśle motoryzacyjnym i wielu innych. Wielkość rynku taśm przenośnikowych z PVC została wyceniona na 139,50 mln USD w 2022 r. i przewiduje się, że osiągnie 214,06 mln USD do 2030 r., przy złożonej rocznej stopie wzrostu na poziomie 4,93% w latach 2023-2030 (*Raport VMR, 2023*).

Polimery winylowe są otrzymywane w wyniku polimeryzacji, z monomerów które zawierają podwójne wiązania C=C, których główne łańcuchy składają się z atomów węgla powiązanych pojedynczymi wiązaniami kowalencyjnymi typu -C-C-C-C-, jak pokazano na rys. 4.2. Poli(chlorek winylu) oznaczany jako PVC otrzymywany jest w wyniku polimeryzacji chlorku winylu. Ma termoplastyczne właściwości, charakteryzuje się odpornością na działanie wielu środków chemicznych np. rozpuszczalników. Polimer ma również wysoką wytrzymałością mechaniczną (Proniewicz i in., 2021), może podlegać modyfikacjom oraz daje dobre możliwości recyklingu. Polichlorek winylu znajduje szerokie zastosowanie jako matryca do wyrobów ze wzmocnionych tworzyw np. taśm przenośnikowych oraz tkanin o dużej wytrzymałości (Mishra i Yagci, 2016). W tabeli 4.2 zebrano informacje o ulepszonych właściwościach mieszanek PVC.



Rys. 4.2. Schemat struktury PVC (Mishra i Yagci, 2016)

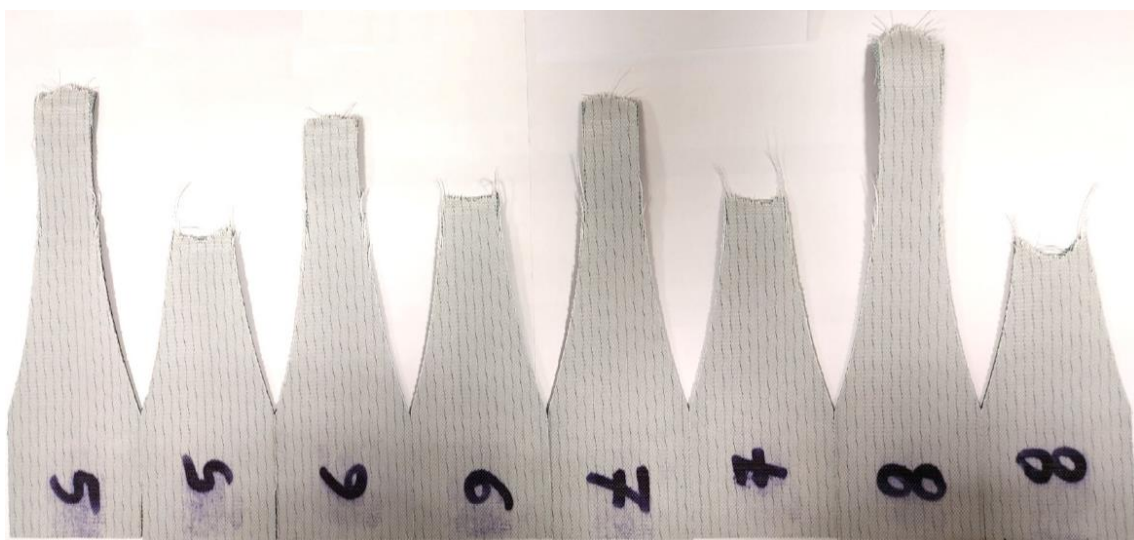
Tab. 4.2. Mieszanki PVC (Mishra i Yagci, 2016)

Polimer	Ulepszona właściwość
ABS, MBS	Odporność na uderzenia, twardość, wytrzymałość na rozciąganie, temperatura odkształcenia
Akryle	Odporność na uderzenia, przezroczystość, odporność chemiczna, olejoodporność, plastyczność
PCL	Plastyczność (nieekstrahowalna), formowalność, odporność na uderzenia.
SAN	Udarność w niskich temperaturach, przetwarzalność i stabilność wymiarowa.
PUR	Plastyczność (nieekstrahowalna), wydłużenie, udarność, wytrzymałość na rozciąganie, udarność w niskich temperaturach
PB	Wytrzymałość, odporność na warunki atmosferyczne
PDMS	Przetwarzalność, stabilność termiczna.

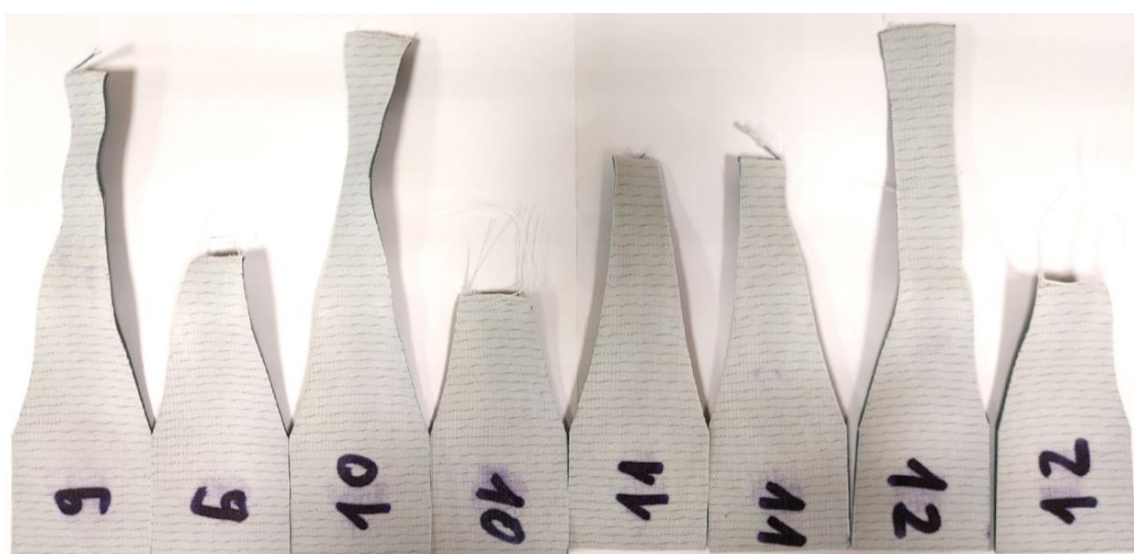
Dla nieuszkodzonej taśmy Enitra EDV08PB-AS 2.0, wykorzystanej w badaniach, wykonano próbę oznaczania właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu wg normy DIN EN ISO 527-1:2019. Wykorzystano próbki typu C, wycięte wg normy PN-EN ISO 283:2016-01. Parametry próby statycznego rozciągania są opisane w tabeli 4.3, a wykresy uzyskane w czasie badań dla próbek wyciętych wzdłuż włókien (rys. 4.3) oraz próbek wyciętych poprzecznie do kierunku włókien (rys. 4.4) umieszczono na rys. 4.5. Wyniki liczbowe zebrano w tabeli 4.4.

Tab. 4.3. Parametry próby statycznego rozciągania

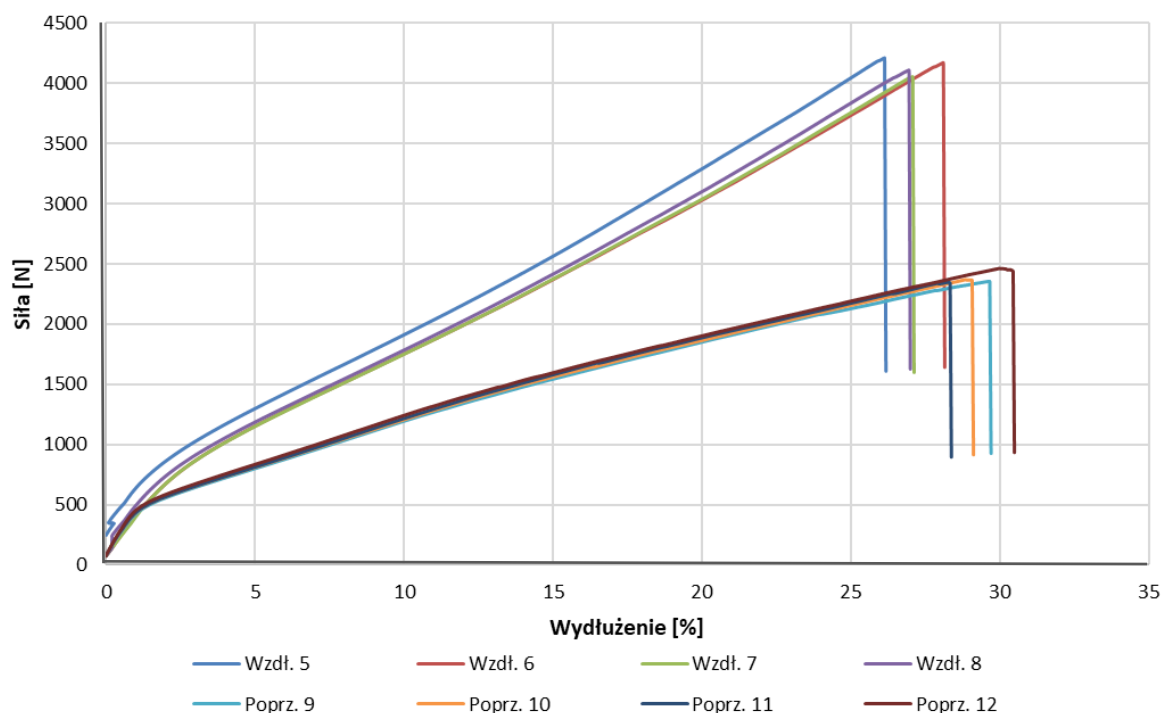
Parametr	Wartość
Siła wstępna	$F_{br1} = 1,5 \text{ MPa}$
Prędkość, przy badaniu modułu sprężystości wzdłużnej	$V_{br1} = 10 \text{ mm/min}$
Prędkość badania	$V_{b1} = 100 \text{ mm/min}$
Odległość uchwytów przy pozycji startowej	$L_{b1} = 233,46 \text{ mm}$
Długość pomiarowa standardowej drogi	$L_{br1} = 100 \text{ mm}$
Szerokość odcinka pomiarowego	$W_{b1} = 25 \text{ mm}$
Grubość odcinka pomiarowego	$T_{b1} = 2 \text{ mm}$



Rys. 4.3. Próbkki bez uszkodzeń wycięte wzdłużnie (oprac. własne)



Rys. 4.4. Próbkki bez uszkodzeń wycięte poprzecznie (oprac. własne)

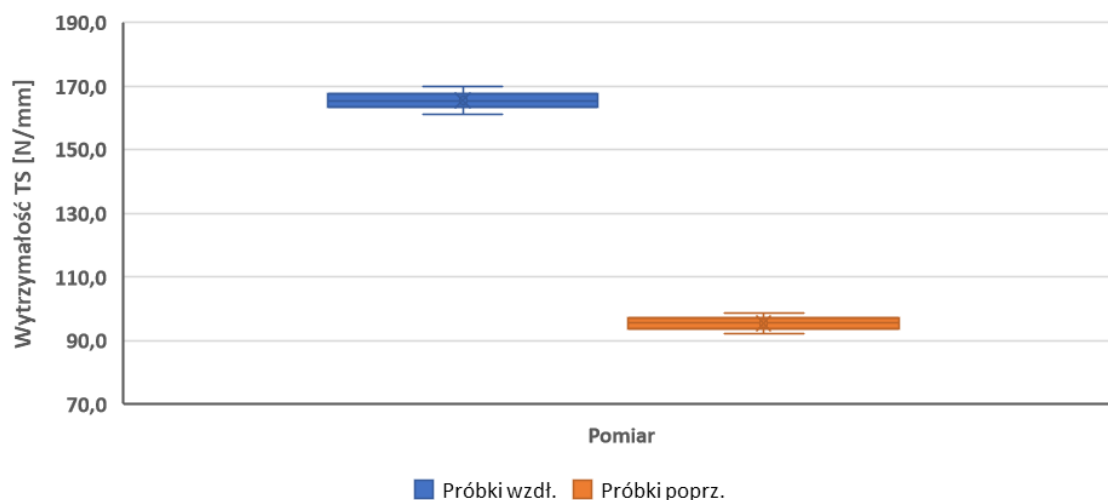


Rys. 4.5. Wyniki próby statycznego rozciągania (oprac. własne)

Tab. 4.4. Wyniki próby statycznego rozciągania (oprac. własne)

Kierunek wycięcia (Numer próbki)	Największa siła rozciągająca [N]	Odształcenie przy zerwaniu ϵ_B [%]	Naprężenie przy zerwaniu σ_B [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie TS [N/mm]
Wzdłużna nr 5	4212,3	26,1	84,2	168,5
Wzdłużna nr 6	4172,5	28,1	83,4	166,9
Wzdłużna nr 7	4056,5	27,1	81,1	162,3
Wzdłużna nr 8	4110,4	27,0	82,2	164,4
Średnia	4137,9	27,1	82,8	165,5
Poprzeczna nr 9	2356,4	29,6	47,1	94,3
Poprzeczna nr 10	2370,0	28,8	47,4	94,8
Poprzeczna nr 11	2349,7	28,3	47,0	94,0
Poprzeczna nr 12	2463,3	30,0	49,3	98,5
Średnia	2384,8	29,2	47,7	95,4

Zarejestrowane wyniki podczas próby statycznego rozciągania wskazują na istotną różnicę wartości naprężenia zrywającego w zależności od kierunku wycięcia próbki z badanej taśmy. Różnica ta wyniosła 48 %, a wartość największą naprężenia zrywającego zarejestrowano dla próbki wyciętej wzdłużnie, tj. kierunku odpowiadającym kierunkowi pracy taśmy na przenośniku.



Rys. 4.6. Analiza statystyczna (oprac. własne)

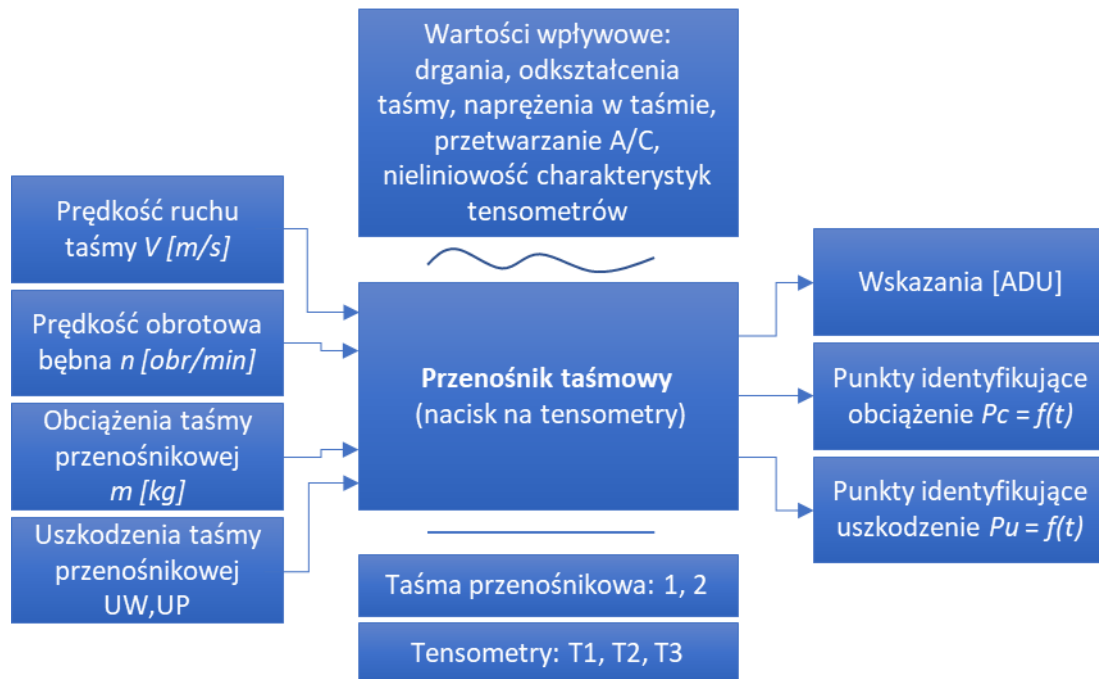
Na rys. 4.6 przedstawione zostały wyniki analizy statystycznej wytrzymałości na rozciągane taśmy przenośnikowej w kierunku wzdłużnym oraz poprzecznym do kierunku pracy taśmy na stanowisku badawczym. Dla przyjętego przedziału ufności 95% ($\alpha = 0,05$) wartości wynoszą:

- Próbki wzdłużne: $165,5 \pm 4,4$ N/mm
- Próbki poprzeczne: $95,4 \pm 3,4$ N/mm

Przeprowadzone próby jednoznacznie wskazują, że badana taśma charakteryzuje się właściwościami anizotropowymi i posiada mniejszą wartość odkształcenia oraz większą naprężenia zrywającego w kierunku wzdłużnym. Dla badanej taśmy określono parametr NTS – nominalnej wytrzymałości taśmy na rozciąganie. Przyjęto najmniejszą zmierzoną wartość dla kierunku pracy taśmy na przenośniku $NTS = 162,3$ N/mm.

4.2. Plan eksperymentu

Badany system pomiarowy, mający monitorować stan taśmy przenośnikowej podczas pracy, posiada szereg danych wejściowych, których wpływ na wskazania tensometrów jest badany. Jednocześnie w czasie pracy przenośnika występuje szereg wielkości wpływowych, które oddziałują w sposób niekontrolowany (losowy) na wyniki pomiarów. Mając niezmiennie czynniki związane z właściwościami badanych taśm i charakterystyką zastosowanych tensometrów, możemy ocenić zdolność systemu pomiarowego do wykrywania charakterystycznych punktów pomiarowych, identyfikujących obciążenia i uszkodzenia taśmy w czasie ich oddziaływania na czujniki, odpowiednio $P_c = f(t)$ oraz $P_u = f(t)$. Schematycznie zostało to pokazane na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Schematyczne przedstawienie obiektu badań (oprac. własne)

Zgodnie z zasadami planowania eksperymentów, działanie tensometrycznego systemu monitorującego pracę taśmy przenośnikowej analizowano w następujących warunkach, zmieniając wielkości na wejściu:

1) Prędkość liniowa taśmy V (kontrolowana poprzez prędkość obrotową bębna napędowego n) była zadawana następująco:

- dla badań statycznych, tj. przy prędkościach $V = 0$ m/s i $n = 0$ obr/min, wykonano kalibrację tensometrów, opisane szczegółowo w rozdziale 5.1, oraz regulowano równomierny naciąg taśmy na bębny przenośników, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.1,
- $V_0 = 0,25$ m/s i $n_0 = 80$ obr/min, dla badań dynamicznych, podczas których wykrywano uszkodzenia taśmy nr 1, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.3,
- $V_1 = 0,5$ m/s i $n_1 = 159$ obr/min, dla badań dynamicznych, podczas których weryfikowano i regulowano naciąg taśmy, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.1, obciążano nieuszkodzone taśmy przenośnikowe nr 1 i 2, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.2, oraz wykrywano uszkodzenia obu taśm, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.3,
- $V_2 = 1$ m/s i $n_2 = 318$ obr/min, dla badań dynamicznych, podczas których obciążano nieuszkodzone taśmy przenośnikowe nr 1 i 2, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.2 oraz wykrywano uszkodzenia obu taśm, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.3,

- $V_3 = 1,6 \text{ m/s}$ i $n_3 = 520 \text{ obr/min}$, dla badań dynamicznych, podczas których obciążano nieuszkodzone taśmy przenośnikowe nr 1 i 2, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.2, oraz wykrywano uszkodzenia obu taśm, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.3.

2) Dla tych prędkości taśmy stosowano następujące obciążenia, opisane szczegółowo w rozdziałach 5.2.1 i 5.2.2:

- bez obciążenia wykonano badania statyczne, w tym kalibrację i ustawianie naciągu taśmy, rejestrację wskazań dla nieuszkodzonej taśmy oraz wykrywania uszkodzeń taśmy,
- podczas badań statycznych ($V = 0$) dokonano kalibracji tensometrów, umieszczonych na jednym z bębnow przonośnika, wykorzystując odważniki o następujących masach m_k :
 $m_{k1} = 3268 \text{ g}$ (32,05 N), $m_{k2} = 5261 \text{ g}$ (51,59 N), $m_{k3} = 6270 \text{ g}$ (61,49 N),
 $m_{k4} = 7273 \text{ g}$ (71,32 N), $m_{k5} = 8282 \text{ g}$ (81,22 N), $m_{k6} = 9371 \text{ g}$ (91,37 N).
- podczas badań dynamicznych przy zadawanych prędkościach obrotowych: $n_1 = 159 \text{ obr/min}$, $n_2 = 318 \text{ obr/min}$, $n_3 = 520 \text{ obr/min}$, testowane taśmy nr 1 i 2 były obciążane odważnikami o następujących masach m_i : $m_{i0,5} = 0,5 \text{ kg}$, $m_{i1} = 1 \text{ kg}$, $m_{i2} = 2 \text{ kg}$, $m_{i3} = 3 \text{ kg}$ i $m_{i5} = 5 \text{ kg}$.

3) Dla tych prędkości taśmy przeprowadzono też badania, zadając uszkodzenia, opisane szczegółowo w rozdziale 5.2.3:

- uszkodzenia wzdłużne taśmy nr 1: UW I, UW II i UW III w pierwszym etapie badań, UW I, UW II, UW III, UW IV w drugim etapie badań, oraz UW I, UW II, UW III, UW IV w trzecim etapie badań,
- uszkodzenia poprzeczne taśmy nr 1: UP I w drugim etapie badań, UP I, UP II, UP III, w trzecim etapie badań,
- uszkodzenia wzdłużne taśmy nr 2: UW I, UW II, UW III, UW IV, w pierwszym etapie badań, UW I, UW II, UW III, UW IV w drugim etapie badań,
- uszkodzenia poprzeczne taśmy nr 2: UP I, w pierwszym etapie badań, UP I, UP II, UP III, w drugim etapie badań.

Dodatkowo monitorowano obszar łączenia końców taśmy przenośnikowej oznaczony jako ŁĄCZENIE dla każdego etapu badań taśm nr 1 i 2.

Uszkodzenia charakteryzujące niezgodności taśmy to:

- UW III, Nacięcie wzdłużne o długości 45 mm i głębokości 1 mm
- UW IV, Nacięcie wzdłużne o długości 50 mm i głębokości 1,5 mm,

Uszkodzenia charakteryzujące wady taśmy to:

- UW I, Przecięcie wzdłużne taśmy o długości 50 mm
- UW II, Przecięcie wzdłużne taśmy o długości 70 mm
- UP I, Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, w środkowej części taśmy
- UP II, Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, na krawędzi taśmy
- UP III, Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, na krawędzi taśmy

W zależności od zmian danych na wejściu (prędkość, obciążenia, uszkodzenia), były rejestrowane zmienne na wyjściu:

- dane liczbowe w postaci zmiany wartości wskazań trzech tensometrów [ADU], zależnych od wartości nacisków monitorowanej taśmy na bęben zwrotny,

- wizualizacja przebiegów w postaci wykresów zależności wskazania trzech tensometrów od czasu t [s], wykorzystana do dalszej analizy porównawczej.

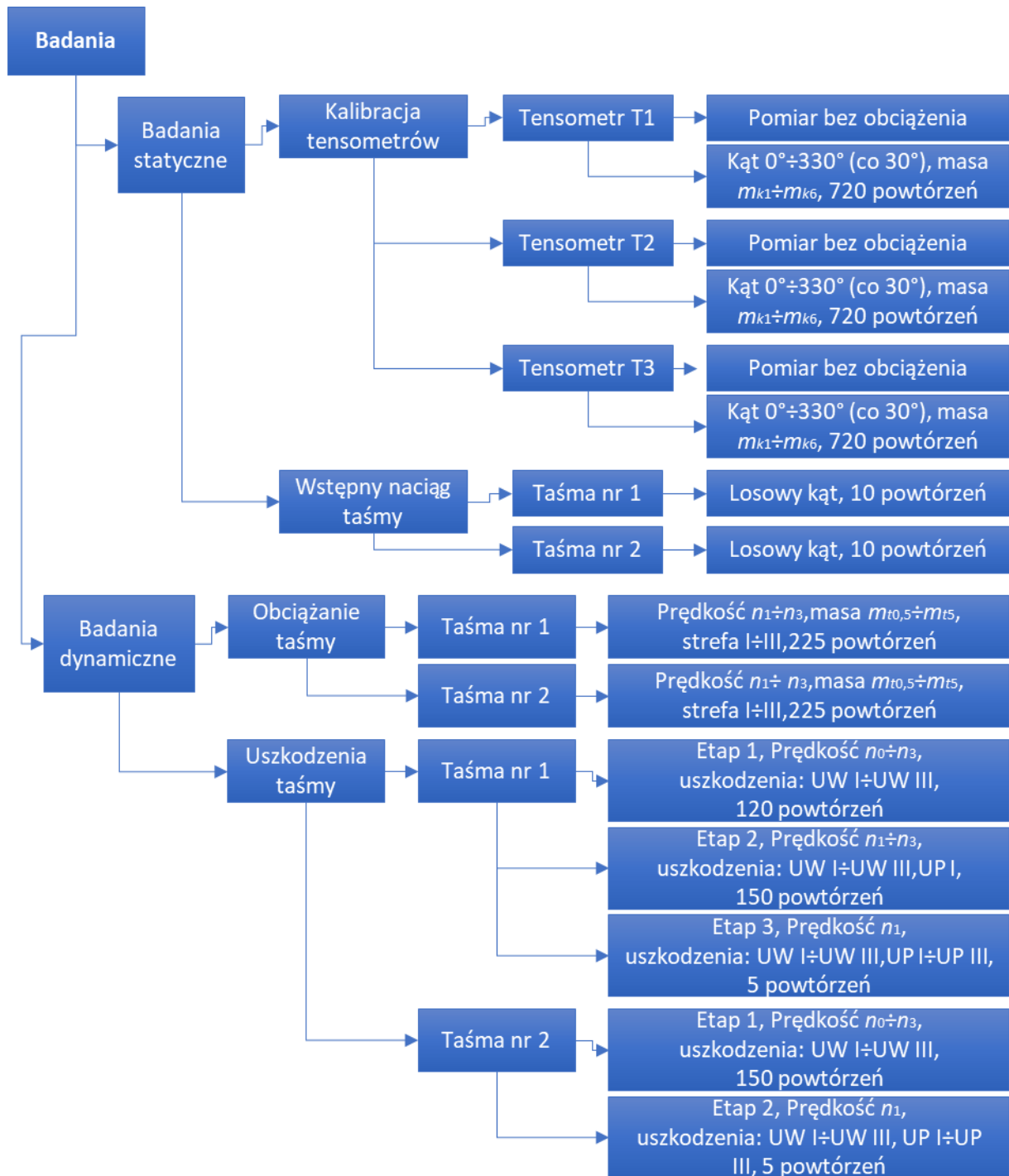
Należy wskazać też wartości wpływowe, które nie będąc wielkością mierzoną w danym procesie wpływały na wyniki pomiarów. Należą do nich drgania, odkształcenia taśmy, naprężenia w taśmie, a także błędy pomiaru wynikające z przetwarzania A/C i nieliniowości charakterystyk tensometrów.

Wartościami stałymi we wszystkich eksperymentach były:

- ogólne właściwości badanych taśm: tekstylna taśma przenośnikowa nr 1, tekstylna taśma przenośnikowa nr 2;
- właściwości trzech tensometrów, użytych we wszystkich badaniach: T1, T2, T3

Plan badań schematycznie został przedstawiony na rys.4.X. Eksperymenty wykonywano wg procedur, opisanych szczegółowo w następujących rozdziałach pracy:

1. zbadanie właściwości mechanicznych zastosowanej w eksperymentach taśmy, rozdział 4.1,
2. zdefiniowanie parametrów metrologicznych (wej, wyj, stałe, zakłócenia), rozdział 4.2,
3. zbudowanie stanowiska pomiarowego z zastosowaniem tensometrów paskowych, rozdział 4.3,
4. zbudowanie stanowiska do kalibracji tensometrów, rozmieszczonych na bębnie przenośnika, rozdział 4.4,
5. wykonanie pomiarów statycznych, przeprowadzenie kalibracji czujników tensometrycznych, rozdział 5.1,
6. wyznaczenie niepewności i powtarzalności pomiaru, rozdział 5.1,
7. wykonanie serii pomiarów statycznych, podczas procedury naciągu taśmy na stanowisku badawczym, rozdział 5.2.1,
8. wykonanie serii pomiarów dynamicznych bez obciążenia, dla taśmy nr 1 i 2, rozdział 5.2.1,
9. wykonanie serii pomiarów dynamicznych z obciążeniem, dla taśmy nr 1 i 2, rozdział 5.2.2,
10. zbudowanie stanowiska do wykonywania uszkodzeń, rozdział 4.5,
11. wykonanie serii pomiarów dynamicznych dla taśmy nr 1 z uszkodzeniami, rozdział 5.2.3,
12. wykonanie serii pomiarów dynamicznych dla taśmy nr 2 z uszkodzeniami, rozdział 5.2.3,
13. zbadanie właściwości mechanicznych próbek taśm z uszkodzeniami, takimi jak wykonane i wykrywane w warunkach dynamicznych, dla taśm nr 1 i 2, rozdział 5.2.4,
14. opracowanie i analiza wyników eksperymentów, rozdział 5.2.

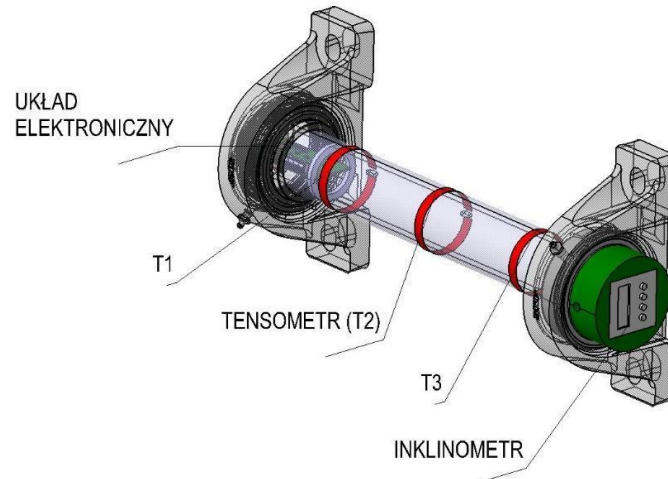


Rys. 4.8. Schemat blokowy badań eksperymentalnych (oprac. własne)

Zaplanowany w ten sposób program badań umożliwi udowodnienie, że układ badawczy z tensometrami paskowymi daje powtarzalny sygnał pomiarowy zależny od stanu taśmy przenośnika, w tym od charakteru jej obciążenia, prędkości posuwu oraz obecności uszkodzeń. Na tej podstawie można dokonać oceny zdolności badanego systemu pomiarowego do identyfikacji obciążenia oraz do wczesnego wykrycia w czasie rzeczywistym uszkodzeń o różnych rozmiarach i miejscach położenia na taśmie. W ten sposób zostanie osiągnięty cel użyteczny, dotyczący możliwości wykorzystania informacji w postaci charakterystycznych wskazań systemu do podejmowania decyzji o działaniach zapobiegawczych, zwiększających bezpieczeństwo pracy i pozwalających uniknąć destrukcyjnej awarii taśmy oraz całego przenośnika.

4.3. Budowa układu pomiarowego

Głównym elementem układu pomiarowego (zgłoszenie patentowe nr P.447569) są foliowe tensometry paskowe, oznaczone jako T1, T2 i T3, przyklejone do bębna przenośnika, jak pokazano na rys. 4.9.

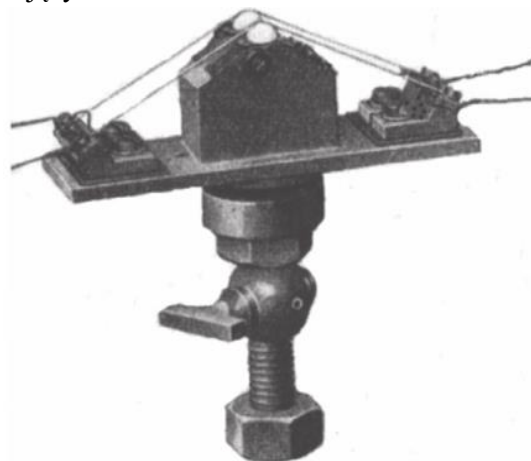


Rys. 4.9. Zastosowanie tensometrów w badanym układzie pomiarowym (oprac. własne)

Obecnie stosowane tensometry znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach techniki, są wykorzystywane do pomiaru odkształceń lub wielkości mechanicznych w przetwornikach mierząc powstające na elemencie pomiarowym przetwornika odkształcenia. Znajdują zastosowanie w eksperymentalnej analizie naprężeń, gdzie określa się wartość naprężeń z mierzonych odkształceń elementu podczas pomiaru, pozwalając na precyzyjne określenie stanu obciążenia badanego elementu.

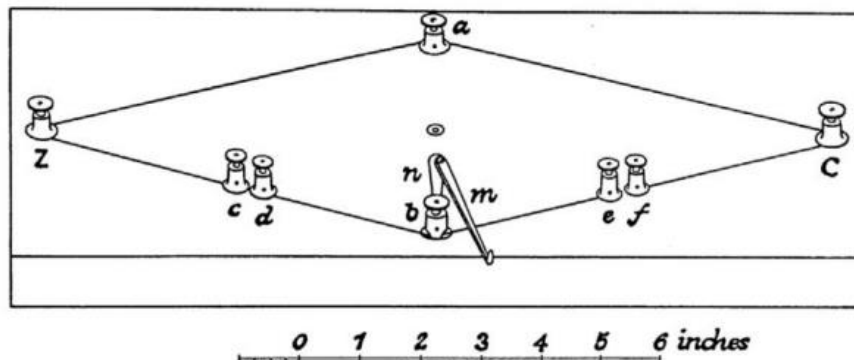
4.3.1. Rozwój czujników tensometrycznych

Wzajemne zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w elemencie są definiowane przez prawa materiałowe odpowiednie dla materiału elementu oraz stanu obciążenia. Prawo Hooke'a znajduje zastosowanie w zakresie odkształceń sprężystych, jednak nie znajduje użycia w zakresie odkształceń elastoplastycznych. Tensometr przenosi odkształcenia z obciążonego elementu zmieniając swoją rezystancję wykrywa odkształcenie badanego elementu. W tensometrach elektrooporowych jest wykorzystywane efekt tensooporowy odkryty przez Thomsona-Kelvina w 1856 roku, polegający na wzroście rezystancji metali pod wpływem naprężeń rozciągających i zmniejszeniu wartości rezystancji pod wpływem naprężeń ściskających.



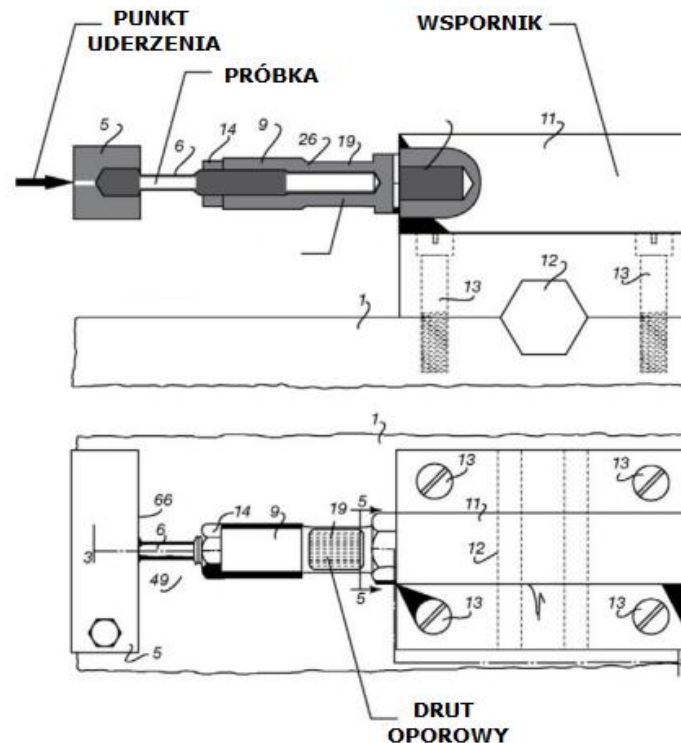
Rys. 4.10. Przetwornik ciśnienia opracowany przez Nernsta (Keil, 2017)

Zastosowania technicznego zmiany wartości rezystancji drutów oporowych w zależności od ich odkształcenia do pomiaru ciśnienia przypisuje się Nernstowi, który zaprojektował przetwornik, ukazany na rys. 4.10, w 1917 roku (Keil, 2017). Przedstawiony na rysunku 4.11 mostek Wheatstone'a został użyty do pomiaru zmiany wartości rezystancji.



Rys. 4.11. Obwód mostka Wheatstone'a w jego oryginalnej postaci z 1843 r. (Keil, 2017)

Wynalezienie tensometru przypisuje się dwóm osobom: profesorowi Arthurowi C. Ruge'owi oraz Edwardowi E. Simmonsowi którzy nie mieli ze sobą kontaktu i prowadzili badania w oddalonych od siebie miejscach na terenie Stanów Zjednoczonych. Prowadzący badania zachowania się metali pod wpływem obciążeń uderowych w Kalifornijskim Instytucie Technologii Edward Simons w 1936 roku, po kilku latach, w 1940 roku opatentował wynalazek w urzędzie Patentów USA. Schemat urządzenia przedstawia rys. 4.12. Tensometr był jedną ze składowych stanowiska badawczego, co wskazuje na fakt, że przetwornik zawierający tensometr został opatentowany przed tensometrem.

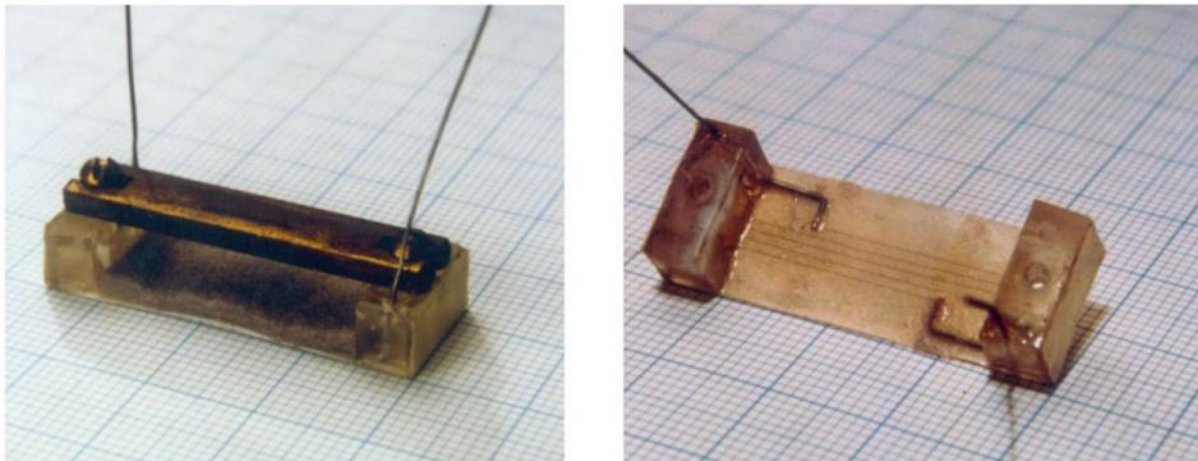


Rys. 4.12. Rysunek stanowiska z Patentu E.E. Simmonsa (Keil, 2017)

Profesor Arthur C. Ruge w 1938 r. prowadził badania w dziedzinie sejsmologii, m.in. wpływu trzęsień ziemi na konstrukcje mechaniczne. Stanowiskiem testowym był model zbiornika na wodę przytwierdzony do stołu wibracyjnego. Przymocowany do zbiornika za pomocą cementu cienki drut

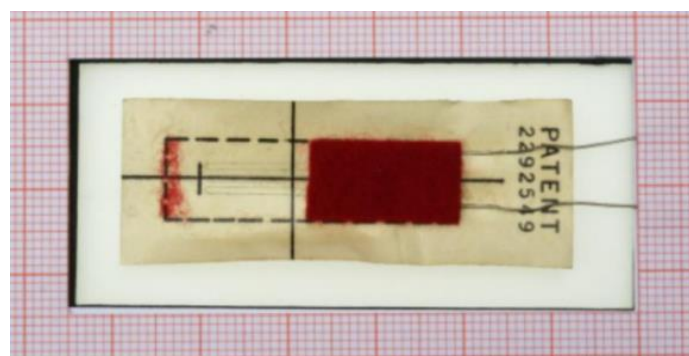
z potencjometru w konsekwencji generował powtarzalne wartości pomiarowe, których nie udawało się zmierzyć przy pomocy innych dostępnych mechanicznych oraz optycznych przyrządów z uwagi na niską wartość naprężeń.

Tensometr (rys. 4.13) został opatentowany 6 czerwca 1944 roku jest jeden z pierwszych tensometrów wykonanych przez Ruge'a z mosiężnym prętem i bez niego oraz z usuniętą filcową warstwą ochronną. Wartą przytoczenia jest odpowiedź MIT jaką dostał profesor po złożeniu pomysłu w 1938 roku komitetowi patentowemu odnośnie do tensometru: „ten rozwój jest interesujący; Komitet nie uważa, aby wykorzystanie komercyjne miało duże znaczenie... wszelkie prawa, które instytut może mieć w odniesieniu do tego wynalazku, powinny zostać zrzeczone na twoją korzyść” (Keil, 2017)



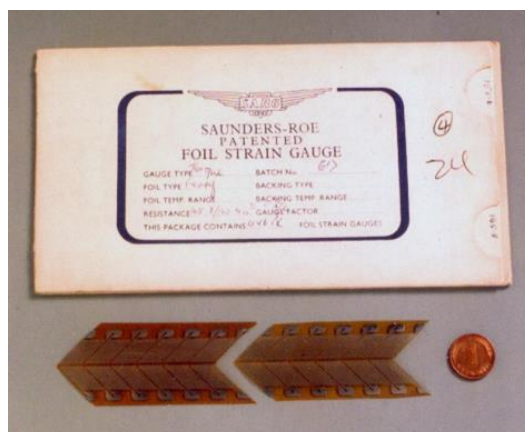
Rys. 4.13. Tensometr Ruge'a z 1938 roku (Keil, 2017)

Przed rejestracją patentową wynalazku tensometru profesora Ruge'a, firma Baldwin-Southwark zawarła umowę pomiędzy Simmonsem a Ruge-deForest, uznając za wynalazców Simmonsa i Ruge'a. Rejestrując jako znak towarowy produktu nazwę „SR-4” jako Simmons i Ruge oraz cyfrę 4 odpowiadająca czterem osobom biorących udział w dyskusji odnośnie do autora. Rysunek 4.14 pokazuje tensometr SR-4 nosi numer 2 292 549 patentu Simmonsa, z papierowym nośnikiem w stanie, w którym stał się znany na całym świecie.



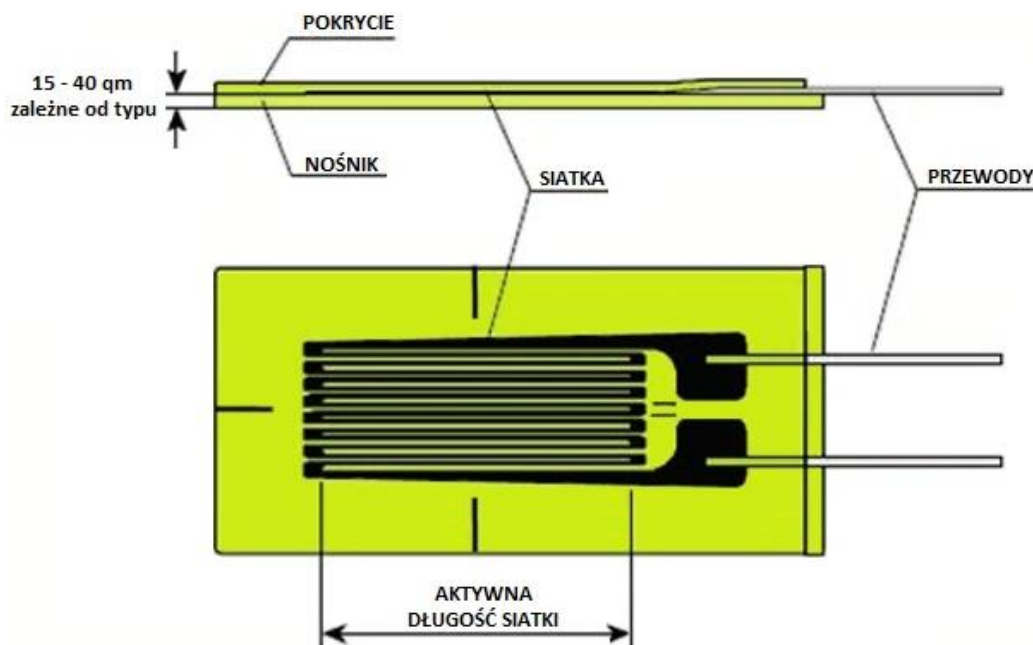
Rys. 4.14. Tensometr SR-4 z nośnikiem papierowym z 1941 roku (Keil, 2017)

W 1952 roku nastąpił kolejny ważny krok w rozwoju tensometrów, którego dokonał Peter Jackson, kiedy wynalazł tensometr z trawioną folią rys. 4.15.



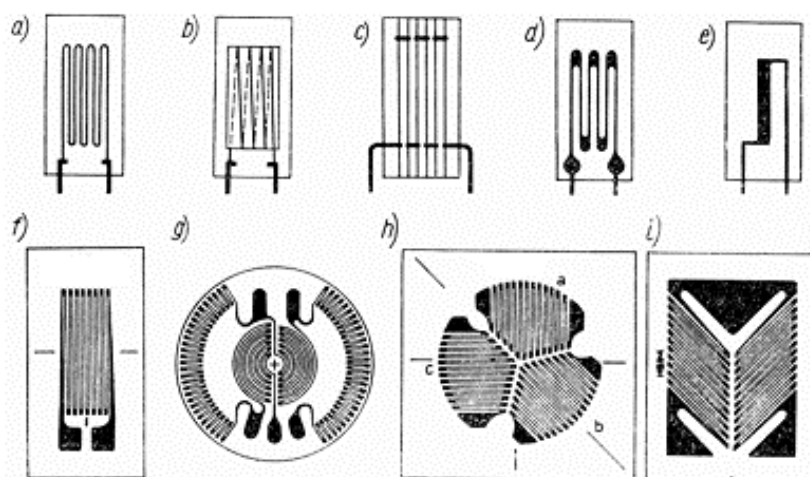
Rys. 4.15. Pierwsze tensometry foliowe firmy Saunders-Roe (Keil, 2017)

Typowy tensometr, schematycznie ukazany na rys. 4.16, jest zbudowany z cienkiego drutu oporowego wykonanego z konstanty lub stopu chromu z niklem o średnicy 0,02 do 0,05 mm wklejonego pomiędzy dwie warstwy folii lub papieru oraz w przypadku tensometrów specjalnych materiał oporowy jest nanoszony wprost, bez pośrednictwa kleju na powierzchnię badanego obiektu.



Rys. 4.16. Budowa typowego tensometru (Pansare i in., 2019)

Siatka rezystancyjna tensometru może mieć różny kształt, co ilustruje rys. 4.17. Ukształtowanie siatki bezpośrednio wpływa na możliwość zastosowania tensometru do danego badania. Na przykład układ kratowy (rys. 4.17c) w porównaniu do wężykowego (rys. 4.17a) jest mniej przydatny do badań zmęczeniowych, jednak, w odróżnieniu od układu wężykowego, odkształcenia poprzeczne nie mają znaczącego wpływu na pomiar odkształceń wzdłużnych.



Rys. 4.17. Układy siatek rezystancyjnych tensometrów różnych typów (Czabanowski 2010):
 a) wężkowego, b) zygzakowatego, c) kratowego, d) foliowego, e) półprzewodnikowego,
 f) foliowego pojedynczego, g) membranowego, h) rozety prostokątnej i) do pomiarów naprężeń stycznych

Ważniejsze parametry techniczne tensometrów są zestawione w tabeli 4.5. Tensometry ze względu na sposób ułożenia siatki (tab. 4.5) można podzielić na metalowe oraz półprzewodnikowe, charakteryzują się podobną konstrukcją. W przypadku półprzewodnikowych jest zastosowany inny rodzaj materiału siatki z jakiego wykonane są druty np. german lub krzem, w wyniku tego mają wysoką wartość współczynnika czułości oraz pozwalają na stosowanie w warnikach statycznych i dynamicznych obciążeń. Istotne cechy tensometru poza geometrią siatki rezystancyjnej to: aktywna długość siatki, stała tensometru, dopuszczalne odkształcenie, rezystancja w stanie nieodkształconym, liniowość, trwałość dynamiczna oraz współczynnik temperaturowy rezystancji.

Tab. 4.5. Parametry tensometrów (Czabanowski, 2010)

Wielkość charakterystyczna	drutowe	foliowe	półprzewodnikowe
Materiał siatki rezystancyjnej	Konstantan; Nichrom; Elinwar		Ge z domieszkami typu n i p , Si z domieszką typu p
Rezystancja [Ω]	Drut $\Phi 12 \div 50 \mu\text{m}$	Folia o grubości $3 \div 8 \mu\text{m}$	$10 \div 100000$
Długość bazy pomiarowej [mm]	$3 \div 150$	$0,2 \div 150$	$0,2 \div 20$
Stała tensometru	$2,1$ (Konstantan); $2,1$ (Nichrom); $3,6$ (Elinwar)		$-100 \div 200$
Liniowość e [%]	$\pm 0,1$ ($e < 0,4\%$); ± 1 ($e < 1\%$)		1 ($e < 0,1\%$)
Dopuszczalne odkształcenie [%]	$1 \div 2$	$3 \div 4$	$0,5$
Liczba cykli	10^7		10^6
Współczynnik temperaturowy rezystancji	$-3,9 \cdot 10^{-6} \div 6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-3}$

Do zalet tensometrów elektrooporowych należy zaliczyć (Kowalewski i Szymczak, 2013):

- możliwość wykonywania pomiarów w trudno dostępnych miejscach,
- niewielkie wymiary oraz masę co powoduje, że w pomijalnym stopniu oddziałują na badany element,
- duża dokładność oraz czułość zapewniając precyzyjny pomiar badanego obiektu,
- możliwość zautomatyzowanej rejestracji wyników pomiarów odkształceń elementów,
- niezależność pomiaru odkształcenia od długości bazy pomiarowej, odczyt w odkształceniach względnych,
- niski koszt oraz łatwość w użyciu podczas wykonywania pomiarów.

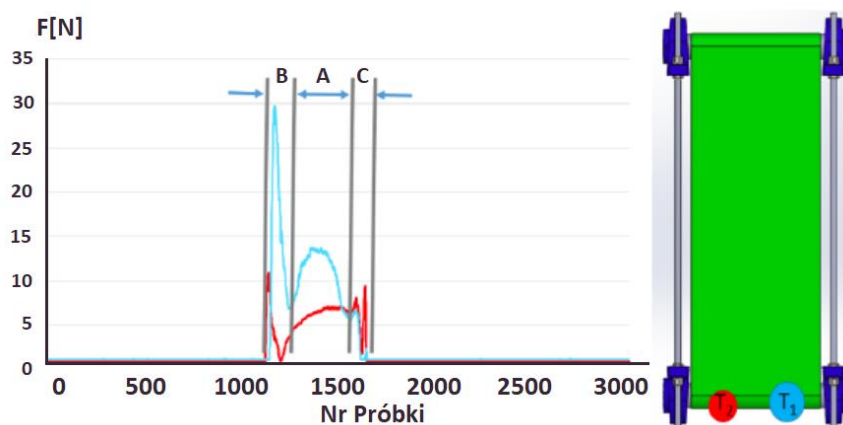
Wśród wad tensometrów elektrooporowych wymienia się (Kowalewski i Szymczak, 2013):

- czasochłonność podczas przygotowania powierzchni do naklejenia tensometru oraz połączenia w odpowiedniej konfiguracji układ,
- wrażliwość na zmiany temperatury,
- wrażliwość na uszkodzenia mechaniczne.

4.3.2. Czujniki tensometryczne w systemie monitorującym stan taśmy przenośnikowej

Obecnie tensometry w wielu przypadkach są jedynymi możliwymi środkami pomiaru wartości odkształcenia i działania naprężenia w badanym elemencie. Pomiar ten można wykonać bez udziału dużego wysiłku oraz środków finansowych (Keil, 2017). Przetworniki tensometryczne pozwalają mierzyć wiele różnych wielkości fizycznych, takich jak siła, przemieszczenie, temperatura, ciśnienie, moment obrotowy i zginający, przyspieszenie, odkształcenie. Istotną kwestią jest możliwość powiązania odkształceń badanego elementu, do którego przytwierdzone są tensometry z wielkością fizyczną, która chcemy zmierzyć (Czabanowski, 2010). Szeroko pojęta tensometria elektrooporowa cały czas znajduje wiele różnych zastosowań praktycznych w wielu dziedzinach obecnej techniki i nauki (Kowalewski i Szymczak, 2013). Właśnie z tego powodu, na podstawie analizy danych literaturowych dotyczących możliwości tensometrycznych systemów pomiarowych, podjęto decyzję zastosowania tensometrów do monitorowania nacisku taśmy na bęben przenośnika.

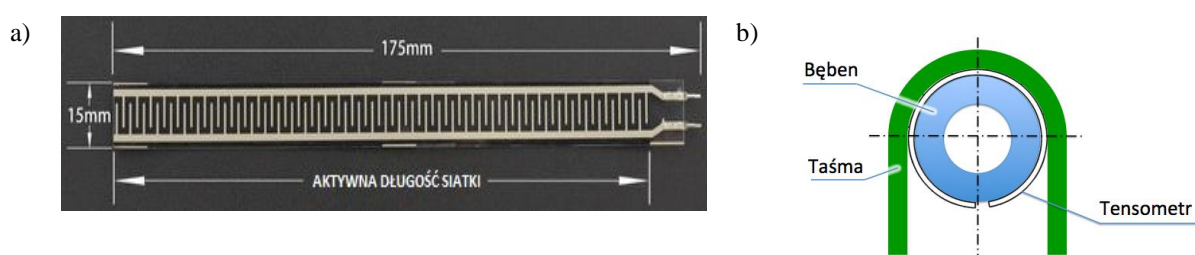
W tensometrycznym systemie pomiarowym, opisanym w rozdziale 3.4.8, istotny wpływ na możliwość otrzymania rzetelnych i użytecznych wyników pomiarów, dających informację o uszkodzeniach taśmy przenośnikowej, ma typ zastosowanego tensometru. We wstępnych badaniach użyto czujników tensometrycznych o średnicy 12 mm (czerwony) oraz 16 mm (niebieski), jak pokazano na rys. 4.18. Za pomocą tych kolorów wyróżniono też przebiegi otrzymanych wartości w trakcie pomiaru z ich zastosowaniem (Bzinkowski i in., 2022).



Rys. 4.18. Wskazania czujników tensometrycznych (Bzinkowski i in., 2022)

Zastosowanie czujników o takim rozmiarze i kształcie nie pozwala na ciągle monitorowanie, ponieważ sygnał dający informacje o stanie taśmy występuje tylko gdy tensometr znajduje się pod naciskiem taśmy, co odpowiada kątowni 180° obrotu wałka z umieszczonymi tensometrami. Stąd podjęto decyzję, że tensometrami zapewniającymi pełny odczyt muszą być czujniki, które będą umieszczone na całym obwodzie, a tym samym zapewniając odczyt pod naciskiem taśmy w zakresie 360° obrotu bębna. Dodatkowym ograniczeniem były piki wskazań na początku i na końcu rejestrowanego sygnału pomiarowego, oznaczone jako odcinki *B* i *C* na rys. 4.18. Zarówno uwzględnianie tej osobliwości sygnału, jak i jej filtrowanie stanowiły pewne utrudnienie i powiększały niepewność pomiaru.

Mając to na uwadze, w innowacyjnym systemie pomiarowym, zbudowanym w ramach realizacji niniejszej rozprawy, zastosowane zostały paskowe cienkowarstwowe czujniki tensometryczne DFRobot RP-L-170 o grubości $t_{tl} = 0,35$ mm, szerokości $w_{tl} = 15$ mm oraz długości części pomiarowej $l_{tl} = 170$ mm, jak pokazano na rys. 4.19. Dane techniczne są zebrane w tabeli 4.6. Na górnej warstwie tensometru znajduje się cienka folia oraz warstwa wrażliwa na nacisk, na dolnej części obwód przewodzący oraz dolna folia (dane producenta). W momencie wywierania nacisku ciśnienie działa na obszar aktywnej, a odłączony obwód dolnej warstwy zostaje połączony przez czułą na nacisk część górną. Efektem jest zmiana wartości rezystancji R_T , zgodnie z nominalną charakterystyką, w której sygnał wyjściowy maleje wraz ze wzrostem wartości siły nacisku na obszar pomiarowy.

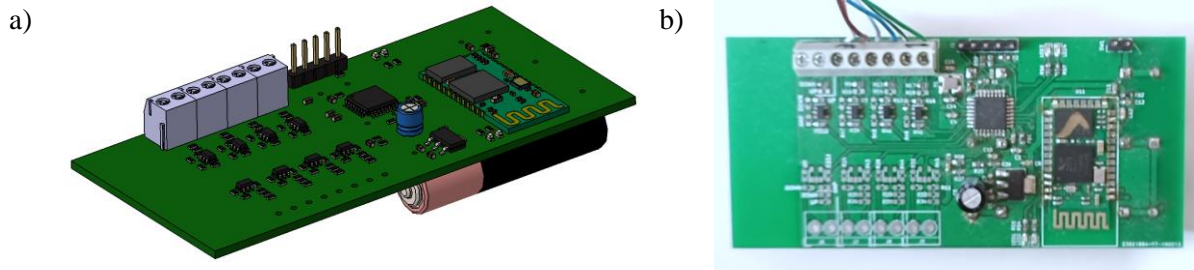


Rys. 4.19. Tensometr RP-L-170: a) struktura (dane producenta, 2023), b) rozmieszczenie na bębnie podczas obciążenia środkowej części tensometru

Tab. 4.6. Parametry i zakres pracy tensometru (dane producenta, 2023)

Dane techniczne	Wartość
Grubość t_{tens}	0,35 mm
Masa wyzwalań m_{wt}	20 g
Zakres pomiaru nacisku	>10 kg
Rezystancja początkowa R_T	>10 M Ω
Czas aktywacji t_{akt}	<0,01 s
Ilość cykli pracy	>1·10 ⁶
Czas reakcji t_{rea}	<10 ms
Temperatura pracy	-40÷85 °C

W skład systemu pomiarowego wchodzi układ elektroniczny, przetwarzający dane analogowe, pochodzące z jednego z trzech czujników tensometrycznych, oznaczonych odpowiednio T1, T2 i T3, na sygnał cyfrowy. Sygnał cyfrowy przy pomocy modułu bluetooth jest przesyłany do programu *Terminal* służącego do komunikacji oraz zapisu danych. Układ elektroniczny składa się z drukowanej płyty, ukazanej na rys. 4.20, zasilanej napięciem 4,5 V, w której znajduje się mikrokontroler z wbudowanym przetwornikiem analogowo-cyfrowym.



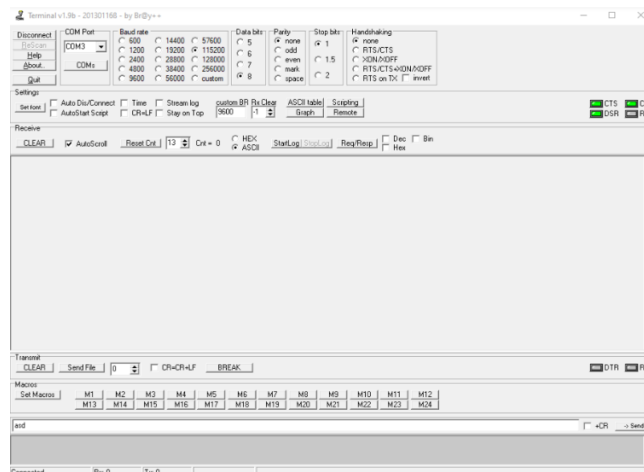
Rys. 4.20. Układ elektroniczny systemu pomiarowego (oprac. własne)

Podczas kalibracji do pomiaru kąta obrotu wałka w trakcie obciążania poszczególnych tensometrów kolejnymi masami wykorzystano inklinometr z rozdzielczością pomiaru $0,1^\circ$ i zakresem 360° , ukazany na rys. 4.21. Inklinometr został oprawiony we wcześniej wydrukowanej w technologii FDM obudowie.



Rys. 4.21. Inklinometr (oprac. własne)

Kolejnym elementem układu pomiarowego jest program *Terminal* umożliwiający wyświetlanie na monitorze komputera (rys. 4.22) zebranych danych oraz zapisywanie w postaci plików tekstowych umożliwiając ich dalszą analizę.

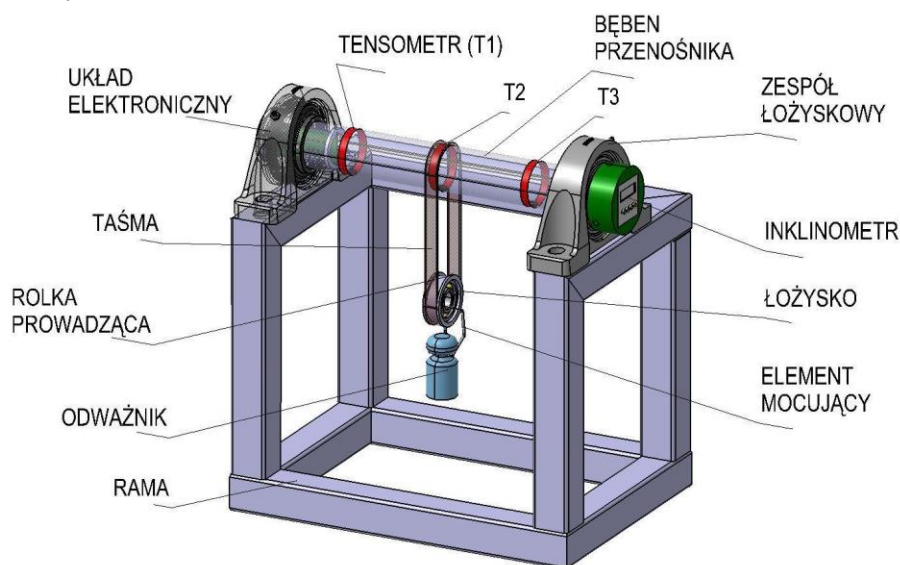


Rys. 4.22. Okno programu *Terminal* (Program *Terminal*, 2023)

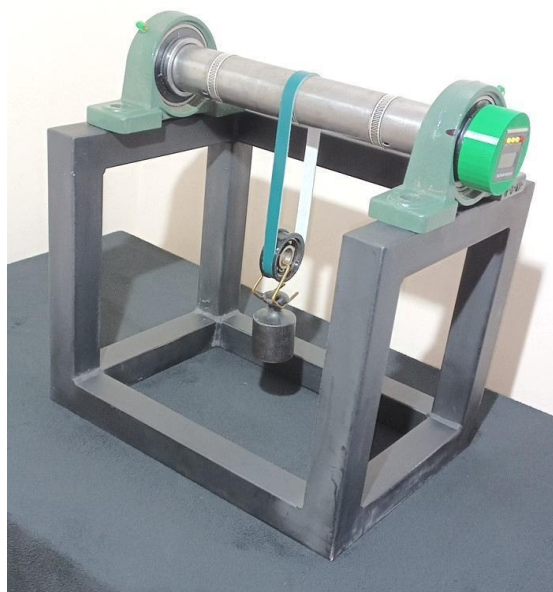
4.4. Stanowisko do kalibracji

Budowę stanowiska do kalibracji tensometrów ukazano schematycznie na rys. 4.23, a na rys. 4.24 umieszczono zdjęcie stanowiska. Składa się z opisanych wcześniej tensometrów T1, T2 i T3, rozmieszczonych na zewnątrz bębna, i elementów układu pomiarowego rozmieszczonych wewnątrz bębna przenośnika. Bęben natomiast osadzono w zespołach łożyskowych z łożyskiem kulkowym samonastawnym i zamocowano na odpowiednio zbudowanej ramie.

Podczas kalibracji nacisk na tensometr jest wywierany przez wąską taśmę, której szerokość odpowiada szerokości paska tensometrycznego. Dzięki temu cała siła wywierana przez taśmę przypada na powierzchnię czujnika. W dolnej części taśmy obraca się rolka prowadząca wydrukowana specjalnie do danego stanowiska w technologii FDM. W rolce jest osadzone łożysko kulkowe, a element mocujący, jakim jest odpowiednio wygięty pręt, pozwala na zaczepianie odważników o różnej wartości masy. W ten sposób odważniki wywierają nacisk o znanej wartości na kalibrowany tensometr paskowy.



Rys. 4.23. Schemat stanowiska do kalibracji (oprac. własne)

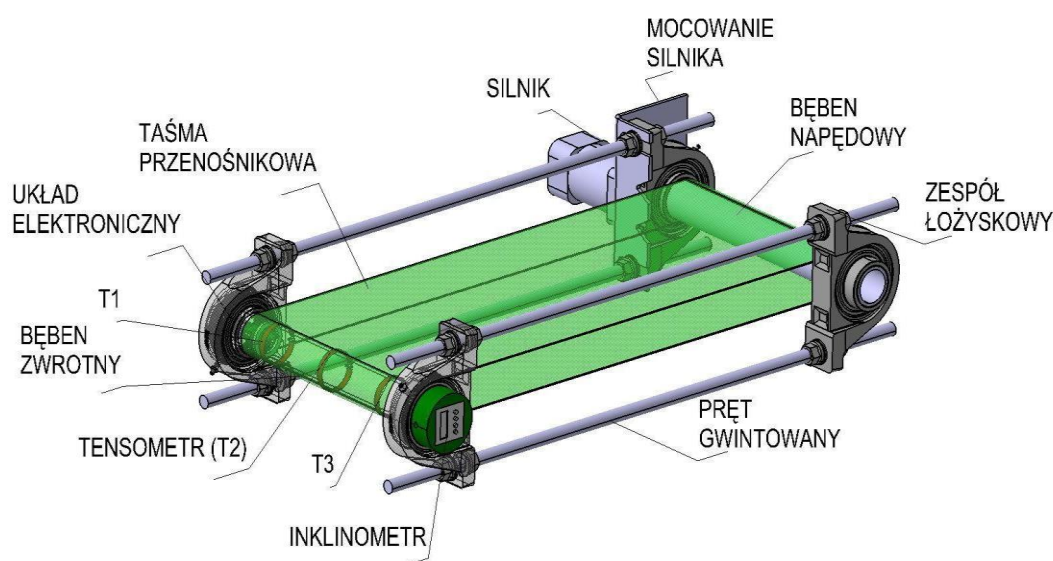


Rys. 4.24. Stanowisko do kalibracji (oprac. własne)

Zastosowane łożysko zapobiega skokowemu przesuwaniu elementu mocującego odważnika podczas jego obciążania oraz zapewnia położenie w środku ciężkości, minimalizując błędy kalibracji. Wartości mas wszystkich elementów systemu obciążenia (taśma, rolka, łożysko, element mocujący) zostały dodane do masy każdego odważnika, z którym wykonywano procedurę kalibracji, szczegółowo opisaną w rozdziale 5.1.

4.5. Stanowisko do badań dynamicznych

Stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono pomiary, stanowił model przenośnika taśmowego, pokazany na rys. 4.25. Jego konstrukcję nośną tworzą cztery zespoły łożyskowe z łożyskiem kulkowym samonastawnym, a w bieżniach wewnętrznych osadzono dwa bębny: napędowy oraz zwrotny, na którym znajdują się tensometry T1, T2 i T3. Oprawy zostały połączone prętami gwintowanymi i skręcone nakrętkami, pomiędzy powierzchniami opraw łożysk po obydwu stronach zastosowano zestawy podkładek soczewkowych niwelujących krzywizny.



Rys. 4.25. Model przenośnika taśmowego (oprac. własne)

Bęben napędowy jest sprzęgnięty z silnikiem, który jest przymocowanym do wspornika połączonego z zespołem łożyskowym oraz dwoma prętami przez połączenia gwintowe. Widok bębna napędowego w zmontowanym stanowisku badawczym umieszczono na rys. 4.26.

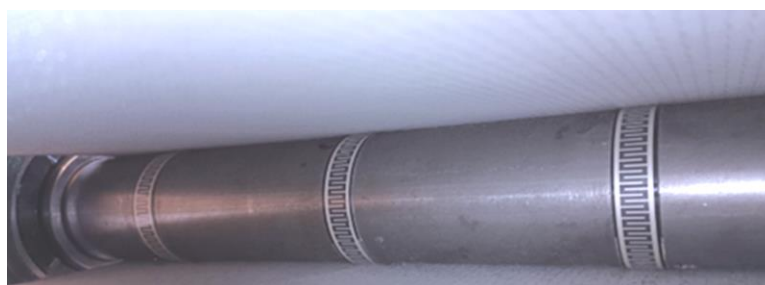


Rys. 4.26. Bęben napędowy z silnikiem (oprac. własne)

Wewnątrz bębna zwrotnego przenośnika, uwidocznionego na rys. 4.27, znajdują się opisane wcześniej elementy układu pomiarowego, a na jego powierzchni w odległości $l_o = 100$ mm od siebie, jak pokazano na rys. 4.28, są rozmieszczone trzy tensometry, będące najważniejszym elementem systemu pomiarowego. Bęben zwrotny jest osadzony w dwóch zespołach łożyskowych z łożyskiem samonastawnym skreślonych w ten sam sposób, jak w przypadku bębna napędowego.

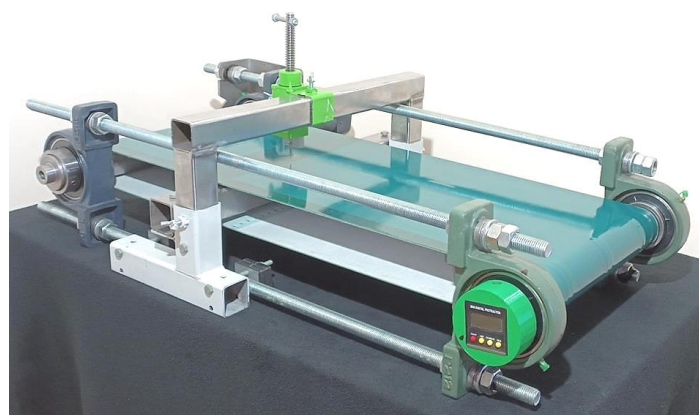


Rys. 4.27. Bęben zwrotny (oprac. własne)



Rys. 4.28. Tensometry na bębnie zwrotnym (oprac. własne)

Taśma przenośnikowa, której stan ma być monitorowany w czasie rzeczywistym na stanowisku badawczym, to najbardziej newralgiczny element przenośnika. Obraca się ona na dwóch bębnach o średnicy 60 mm, opisanych powyżej. Do badań wykorzystano zgrzewaną taśmę transportującą z polichlorku winylu i tekstylnej osnowy o grubości $t = 2$ mm, długości $l = 1875$ mm oraz szerokości $w = 350$ mm, szczegółowo opisaną w rozdz. 4.1. W stanowisku zastosowano kontroler, umożliwiający płynną zmianę prędkości obrotowej silnika, dzięki któremu dla celów badań sprawdzane były trzy wartości prędkości. Była rejestrowana temperatura otoczenia oraz oprawy jednego z zespołów łożyskowych od strony wałka z umieszczonymi tensometrami, przy pomocy dodatkowego czujnika. Na rysunku rys 4.29 zostało przedstawione stanowisko badawcze z dodatkowym układem do generowania uszkodzeń taśmy.



Rys. 4.29. Widok ogólny stanowiska badawczego (oprac. własne)

5. Wyniki badań

5.1. Kalibracja i niepewność pomiaru

Procedurę kalibracji wykonano dla siedmiu wartości obciążenia na uprzednio przygotowanym stanowisku ukazanym na rys. 4.24. Najpierw pomiary wykonano dla tensometru bez obciążenia, a następnie umieszczając odważniki na każdym z trzech tensometrów. Kolejne masy w postaci odważników wieszano na przygotowanym zaczepie, który obracał się na łożysku zapewniającym centryczne położenie. Wykorzystano odważniki, które z uwzględnieniem innych elementów systemu zapewniały następujące masy oraz odpowiednio siły nacisku na tensometry: $m_{k1} = 3268$ g (32,05 N), $m_{k2} = 5261$ g (51,59 N), $m_{k3} = 6270$ g (61,49 N), $m_{k4} = 7273$ g (71,32 N), $m_{k5} = 8282$ g (81,22 N), $m_{k6} = 9371$ g (91,37 N). Opasanie kalibrowanego tensometru na 180° zapewniała rolka prowadząca o tej samej średnicy, jaką ma wałek, na którym były naklejone tensometry.

Zmiany wskazań rejestrowano osobno na każdym tensometrze T1, T2, T3. Zależność wskazania od miejsca nacisku taśmy F_n na tensometr paskowy opasający wałek sprawdzano powtarzając pomiary dla różnych kątów obrotu wałka. Ustawiając wałek w położeniu kątowym co 30° , począwszy od kąta 0° i kończąc na 330° , wykonano 10 pomiarów dla każdego z 12 kątów oraz każdej z mas, rejestrując 2000 wskazań z częstotliwością próbkowania 200 Hz dla każdego pojedynczego pomiaru, końcowo otrzymując 2160 charakterystyk, co pozwoliło na przeprowadzenie analizy statystycznej.

Na niepewność wskazań tensometrów w wyniku wymuszenia nacisku na ich powierzchnię może mieć wpływ wiele czynników. Wśród nich największy wpływ mogą mieć drgania, przetwarzanie sygnału A/C, nieliniowość charakterystyk tensometrów, naprężenia i odkształcenia w taśmie. Wszystkie te czynniki, nakładając się na siebie, będą powodować rozrzuty wyników pomiaru, zwiększając na końcowym etapie eksperymentu rozrzuty wartości wskazań tensometrów zgodnie z zasadą propagacji niepewności. Ze względu na losowy charakter poszczególnych składowych niepewności, do wyznaczania niepewności standardowej może zostać wykorzystana metoda A, która opiera się na analizie statystycznej i jest szczególnie przydatna w przypadku rozkładów normalnych (JCGM 100:2008).

Na rys. 5.1 przedstawiono przykładowy zestaw wskazań jednego z tensometrów, zarejestrowany dla różnych kątów dla wartości obciążenia ciężarem 51,59 N. Dla zebranej serii wyników, uzyskanych przy umieszczeniu ciężaru na wałku ustawionym pod kątem 330° , wykonano test D'Agostino-Pearsona w celu sprawdzania, czy rozkład można uznać za normalny.

Statystyczny test D'Agostino-Pearsona, łączący testy skośności oraz kurtozy, jest używany jako narzędzie do sprawdzania normalności. Testy porównują kształt rozkładu z symetrycznym rozkładem normalnym. Parametr skośności będący miarą asymetrii rozkładu normalnego sprawdza poziom symetrii, czyli testuje zerowe założenie, że rozkład danych jest symetryczny. Parametr kurtozy będący miarą spłaszczenia rozkładu normalnego sprawdza rozkład danych w ogonach i środku, czyli testuje zerowe założenie, że kurtoza jest równa zero (kurtoza rozkładu normalnego). Przeprowadzony test łączy dwie metody: analityczną, tj. formalny test normalności (tab. 1), oraz graficzną, w której wyniki są przedstawione w postaci histogramu uwidocznionego na rysunku 5.2 i wykresu QQ-Plot na rys. 5.3 (*D'Agostino-Pearson Test*, 2023).

$$\text{Skośność} = \frac{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^3}{n}}{\left(\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}\right)^{1,5}} = -0,11 \quad (5.1)$$

$$y = \frac{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^3}{n}}{\left(\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}\right)^{1,5}} \cdot \sqrt{\frac{(n+1)(n+3)}{6(n-2)}} = -2,02 \quad (5.2)$$

$$b = \frac{(n^2 + 27 - 70)(n+1)(n+3)}{(n-2)(n+5)(n+7)(n+9)} = 3,02 \quad (5.3)$$

$$W^2 = \sqrt{(2(b-1))} - 1 = 1,01 \quad (5.4)$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{\ln \ln(w)}} = 15,05 \quad (5.5)$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{W^2 - 1}} = 15,01 \quad (5.6)$$

$$Z_{\text{Skośność}} = d \cdot \ln \ln \left(\frac{y}{a} + \sqrt{\left(\frac{y}{a}\right)^2 + 1} \right) = -2,01 \quad (5.7)$$

$$\text{Kurtoza} = \frac{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^4}{n}}{\left(\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}\right)^2} = 3,03 \quad (5.8)$$

$$E(\text{Kurtoza}) = \frac{3(n-1)}{(n+1)} = 3 \quad (5.9)$$

$$\text{Var}(\text{Kurtoza}) = \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)} = 0,012 \quad (5.10)$$

$$x = \frac{\text{Kurtoza} - E(\text{Kurtoza})}{\sqrt{\text{Var}(\text{Kurtoza})}} = 0,27 \quad (5.11)$$

$$B = \frac{6(n^2 - 5n + 2)}{(n+7)(n+9)} \cdot \sqrt{\frac{6(n+3)(n+5)}{n(n-2)(n-3)}} = 0,33 \quad (5.12)$$

$$A = 6 + \frac{8}{B} \left(\frac{2}{B} + \sqrt{\left(1 + \frac{4}{B}\right)} \right) = 308,6 \quad (5.13)$$

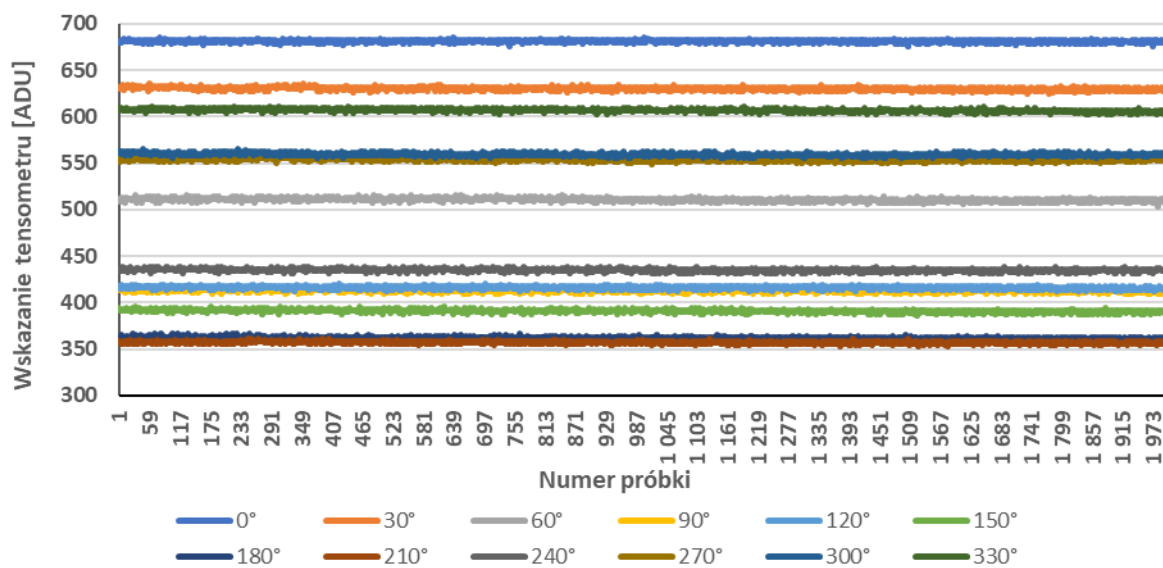
$$\text{pos} = \left(\frac{1-2A}{1+x\sqrt{\frac{2}{A-4}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,99 \quad (5.14)$$

$$Z_{\text{Kurtoza}} = \frac{1 - \frac{2}{9A} \text{pos}}{\sqrt{\frac{2}{9A}}} = 0,32 \quad (5.15)$$

$$x^2(2) = Z_{\text{kurtoza}}^2 + Z_{\text{skośność}}^2 = 0,32^2 + (-2,01)^2 = 4,16 \quad (5.16)$$

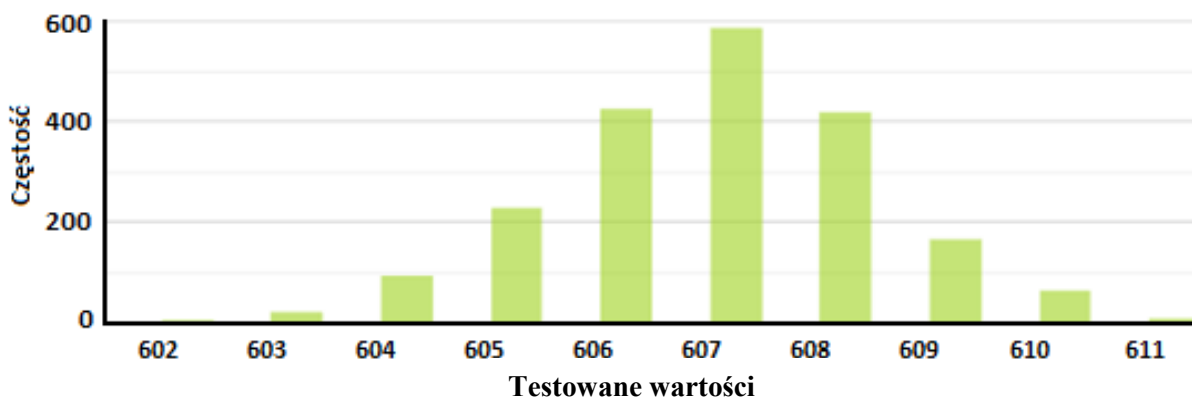
$$p = p(x \leq 4,16) = 0,88 \quad (5.17)$$

$$p - \text{wartość} = 1 - p = 1 - 0,88 = 0,12 \quad (5.18)$$



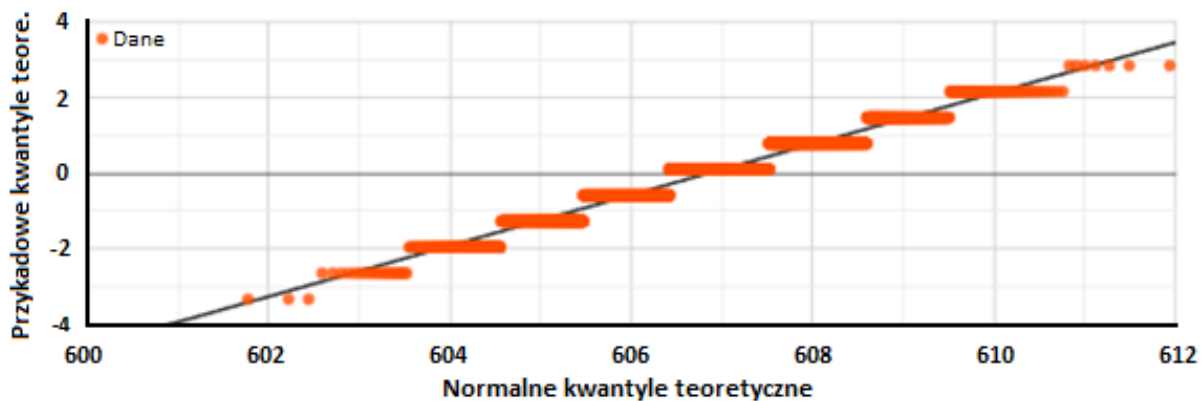
Rys. 5.1. Wskazania przy obciążeniu tensometru 51,59 N, kąty obrotu od 0° do 330° (oprac. własne)

Zarejestrowane wyniki, pozyskane w oparciu o pomiar z użyciem przetwornika analogowo-cyfrowego ADC (ang. *analog to digital converter*), wyrażone są w jednostkach ADU (ang. *analog-to-digital units*) jako wyjście konwersji ADC (*Dane cyfrowe*, 2023). Najniższe wartości poniżej 400 ADU występują dla dwóch kątów odpowiednio: dla 180° to 357 ADU oraz dla 210° – 353 ADU. Jest to związane z osobliwością układu pomiarowego, w którym najmniejsza powierzchnia tensometru, znajdującego się pod naciskiem taśmy F_n w trakcie wykonywania pomiaru, przypada na te dwa kąty. Przykładowe wyniki dla obciążania tensometru 51,59 N oraz kąta 330° w postaci histogramu przedstawiono na rys. 5.2 oraz w postaci wykresu kwantylowego na rys. 5.3.



Rys. 5.2. Histogram wyników dla obciążania tensometru 51,59 N, kąt 330° (oprac. własne)

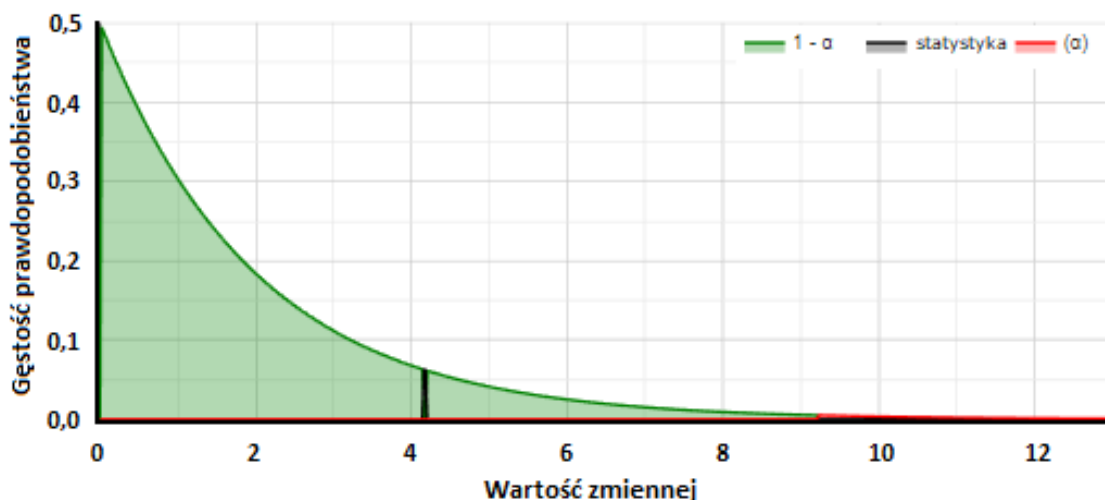
Przedstawione na histogramie dane układają się w przybliżeniu symetrycznie, najwięcej wyników zawiera się w przedziale 606,5-608,5 ADU natomiast skrajne wartości to przedziały 602,0 – 602,5 ADU oraz 611,0 – 611,5 ADU.



Rys. 5.3. Wykres kwantylowy wyników dla obciążania tensometru 51,59 N, kąt 330° (oprac. własne)

Dla danych zebranych przy wartości obciążenia 51,59 N tensometru środkowego (T2 na rys. 4.23), występują trzy potencjalnie wychodzące poza obszar dane o wartości 602 ADC, co stanowi 0,15% obserwacji. Ze względu na czułość testu D'Agostino-Pearsona na obecność wartości odstających, stawiana jest hipoteza H_0 mówiąca, że rozkład jest normalny, lub H_1 , że występuje inny rodzaj rozkładu. Ponieważ wartość $p > \alpha$ poziomu istotności 0,01, przyjmujemy hipotezę H_0 , zakładając, że rozkład danych jest normalny. Wobec tego, różnica między próbką danych a rozkładem normalnym nie jest wystarczająco duża, by była istotna statystycznie.

Natomiast wynik nieistotny nie może dowodzić, że H_0 jest poprawne, a jedynie, że założenie zerowe nie może być odrzucone. Wartość p wynosi 0,12 dla prawdopodobieństwa $P(x \leq 4,16) = 0,88$. Oznacza to, że prawdopodobieństwo błędu I typu, czyli odrzucenia poprawnej hipotezy H_0 , jest zbyt duże i wynosi 0,1248 (12,48%). W teście tym im większa jest wartość p , tym bardziej prawdopodobna jest poprawność hipotezy rozkładu normalnego H_0 . Statystyka testowa χ^2 , przedstawiona w postaci wykresu na rys. 5, wynosi 4,16 co znajduje się w 99% obszaru akceptacji: $[-\infty; 9,21]$. Obserwowana wielkość efektu φ jest bardzo mała, wynosi 0,046. Pokazuje to, że wielkość różnicy pomiędzy rozkładem próbki a rozkładem normalnym jest bardzo mała. Wobec tego założenie zerowe nie może zostać odrzucone, a wielkość efektu można zignorować. Podsumowując, wyniki testu D'Agostino-Pearsona wskazują na to, że istnieje nieistotna różnica w odniesieniu do rozkładu normalnego ($\chi^2(2) = 4,16, p = 0,12$).



Rys. 5.4. Wykres rozkład χ^2 dla analizowanych wyników (oprac. własne)

Zatem dane statystyczne wskazują na rozkład normalny, a tym samym na możliwość oceny niepewności pomiaru metodą typu A, w tym celu wykorzystano dane z serii wykonanych doświadczeń. Przyjmuje się, że niepewność standardowa $u(X)$ pojedynczego pomiaru jest w przybliżeniu równa eksperymentalnemu odchyleniu standardowemu $s(q_k)$ (JCGM 100:2008):

$$u(X) \approx s(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}}, \quad (5.19)$$

gdzie: $\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}$ – wariancja eksperymentalna, $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$ – średnia arytmetyczna wyników pomiaru, q_k – kolejny wynik pomiaru, n – liczba pomiarów.

Jednak ze względu na fakt, że średnia wartość wyników pomiaru najprawdopodobniej znajduje się bliżej wartości rzeczywistej wielkości mierzonej, przedział niepewności dla średniej z serii pomiarów jest węższy niż dla pomiaru pojedynczego. Zgodnie z wytycznymi (JCGM 100:2008), można oszacować niepewność u dla tej średniej, korzystając ze wzoru:

$$u = \frac{S_p}{\sqrt{n}}, \quad (5.20)$$

gdzie: S_p – połączone odchylenie standardowe eksperymentalne.

W przypadku kalibracji, dzięki zadanej częstotliwości próbkowania, uzyskano średnią z 2000 pomiarów, co pozwoliło znacząco zmniejszyć niepewność standardową dla średniej. Następnie obliczono niepewność rozszerzoną według wzoru (JCGM 100:2008):

$$U = k \cdot u(X) \quad (5.21)$$

gdzie: U – niepewność rozszerzona, k – współczynnik rozszerzenia, zależny od przyjętego poziomu ufności, $u(X)$ – niepewność standardowa pojedynczego pomiaru.

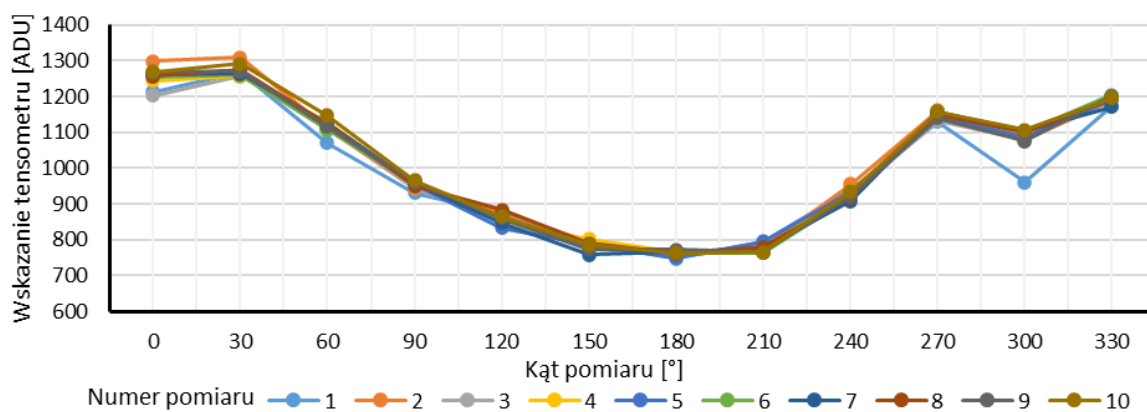
Dla oszacowania niepewności rozszerzonej $U_{0,99}$ przyjęto poziom ufności 99%, dla którego wartość współczynnika wynosi $k = 2,576$ (JCGM100:2008). Tak wysoki poziom ufności wybrano ze względu na to, że system pomiarowy jest dopiero poznawany w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 5.1 przedstawia część zarejestrowanych wyników w trakcie procesu kalibracji tensometru środkowego, oznaczonego T2 na rys. 4.23, podczas pomiarów dla dwunastu kątów od 0° do 330° . W tym przypadku, dla rozpatrywanego tensometru przy obciążeniu 51,59 N wartości minimalne zostały zarejestrowane dla zakresu kąтового 180° - 210° . Wykonano 2000 odczytów, w krótkim czasie z zachowaniem warunków powtarzalności pomiarów, po czym została przeprowadzona analiza statystyczna.

Tab. 5.1. Przykładowe zestawienie wskazań tensometru [ADU], tensometr środkowy (T2), obciążenie 51,59 N, pomiar nr 1

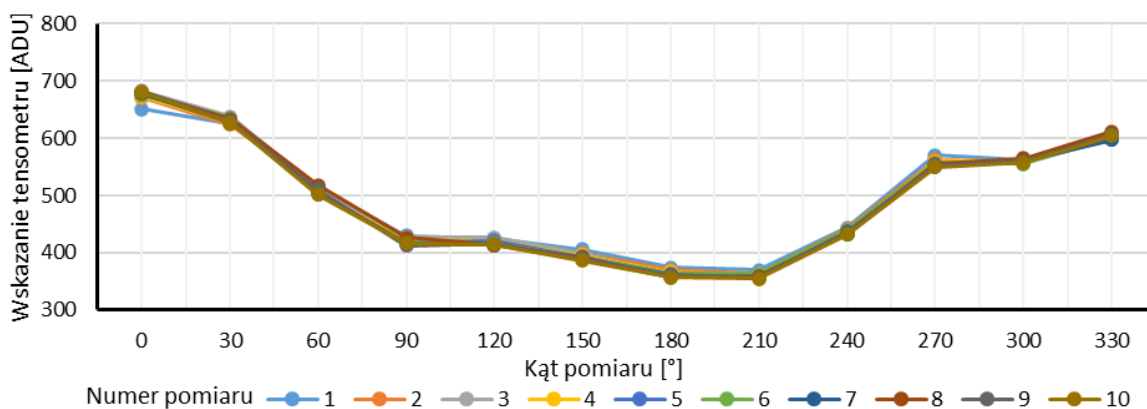
Kąt pomiar. / Lp. wynik	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
1	680	632	510	415	418	394	362	358	434	555	562	607
2	681	631	509	415	417	391	364	358	435	554	562	609
3	681	630	511	414	415	393	362	358	435	552	563	608
4	681	631	512	413	417	391	362	356	437	556	560	609
5	680	632	513	414	415	393	365	356	434	555	562	608
6	681	632	509	413	419	392	365	357	435	554	563	608
7	682	634	510	416	418	392	362	356	438	556	563	606
...												
1994	681	629	507	413	416	389	361	357	436	555	560	605
1995	681	629	513	411	415	390	360	356	434	556	559	602
1996	680	628	509	414	416	389	361	356	434	555	558	604
1997	679	630	508	413	415	388	361	355	434	555	559	606
1998	681	631	509	412	418	392	362	356	435	554	559	605
1999	682	629	511	415	414	390	360	355	435	554	559	606
2000	682	629	509	413	416	390	361	358	435	555	560	605
\bar{q}	651,4	625,9	513,7	429,8	425,6	405,8	374,6	369,4	444,2	570,2	562,1	600,3
$u(X)$	1,20	1,20	1,41	1,28	1,19	1,30	1,24	1,27	1,29	1,26	1,37	1,30
$u = \frac{S_p}{\sqrt{n}}$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$U_{0,99}$	3,09	3,09	3,63	3,30	3,07	3,35	3,19	3,27	3,32	3,25	3,53	3,35
Wartość max.	655	630	519	435	429	410	378	374	449	574	566	606
Wartość min.	647	622	508	425	421	401	370	365	438	565	557	596
Rozstęp R	8	8	11	10	8	9	8	9	11	9	9	10

Dla dużej liczby powtórzeń 2000, możliwej w przypadku kalibracji z zachowaniem warunków powtarzalności, niepewność standardowa u dla wartości średniej \bar{q} wynosi 0,03 ADU, zgodnie ze wzorem (5.20). Oczywiście, w warunkach pracy przenośnika taśmowego pozyskanie takiej liczby wyników jest bardzo utrudnione, dlatego niepewność rozszerzoną $U_{0,99}$ obliczono z uwzględnieniem niepewności standardowej pojedynczego pomiaru $u(X) = 1,41$ ADU. W danym przypadku największa wartość wyniosła $U_{0,99} = 3,6$ ADU, co można uznać za bardzo dobry wynik. Na wykresach na rys. 5.5 - 5.10 przedstawiono wyniki 10 powtórzeń pomiarów dla różnych położeń kątowych bębna zwrotnego, zadając różne obciążenia tensometru T2. Za każdym razem zarejestrowano 24000 wskazań.



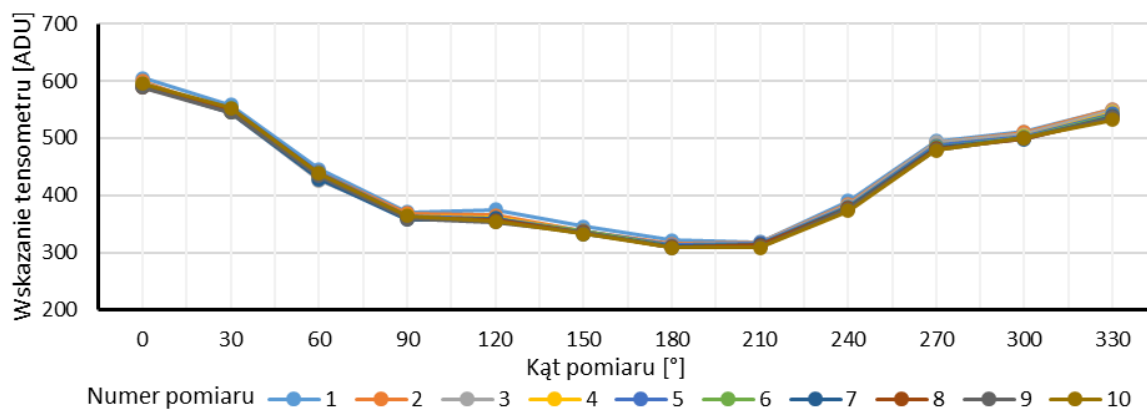
Rys. 5.5. Wartości wskazań przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 32,05 N (oprac. własne)

Jak widać z wykresu na rys. 5.5, wskazania tensometru paskowego w powtarzalny sposób różnią się w zależności od położenia kąтового bębna, na którym jest on umieszczony. Najmniejsza wartość średnia przy obciążaniu tensometru T2 ciężarem 32,05 N wyniosła 760,01 ADU dla kąta 180°. Na etapie budowy stanowiska do kalibracji (rys. 4.23) przy pomocy inklinometru zostało określone, że zakres kątowy 180°-210° znajduje się w środkowej części tensometru. Na tej podstawie można stwierdzić, że w chwili pomiaru, zarejestrowanego i przedstawionego na rys 5.5, masa znajduje się w środkowej części tensometru pokazanego na rys. 4.19b



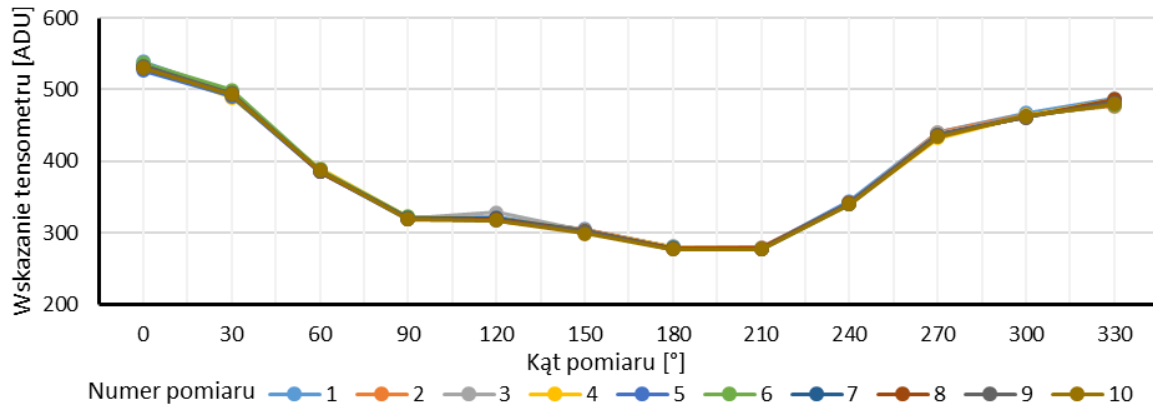
Rys. 5.6. Wartości wskazań przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 51,59 N (oprac. własne)

Najmniejsza wartość średnia przy obciążaniu tensometru T2 ciężarem 51,59 N wyniosła 361,08 ADU dla kąta 210° (rys. 5.6). Należy odnotować, że wartość wskazań tensometru przy większych obciążeniach jest niższa, lecz najniższe wskazanie jest o 40-45% mniejsze niż największe. Jest to widoczne na kolejnych rysunkach 5.7-5.10.



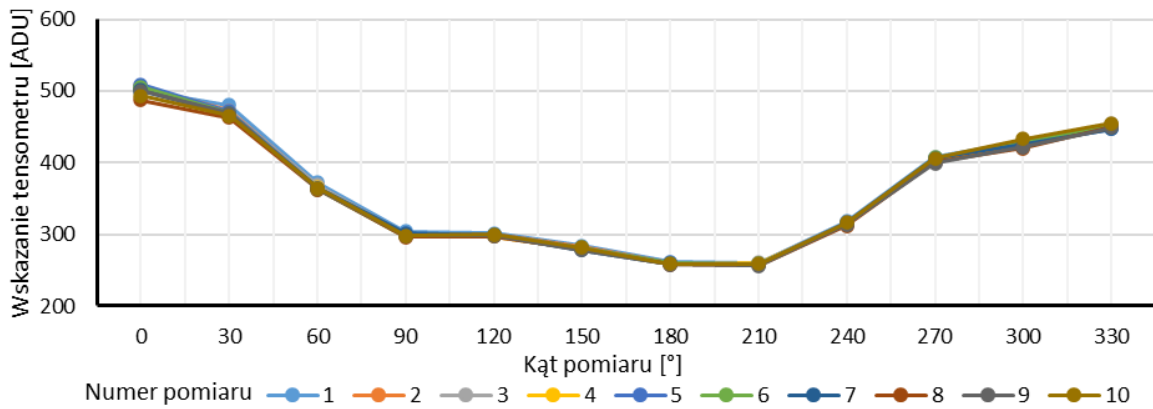
Rys. 5.7. Wartości wskazań przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 61,49 N (oprac. własne)

Najmniejsza wartość średnia przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 61,49 N wyniosła 312,17 ADU dla kąta 180°.



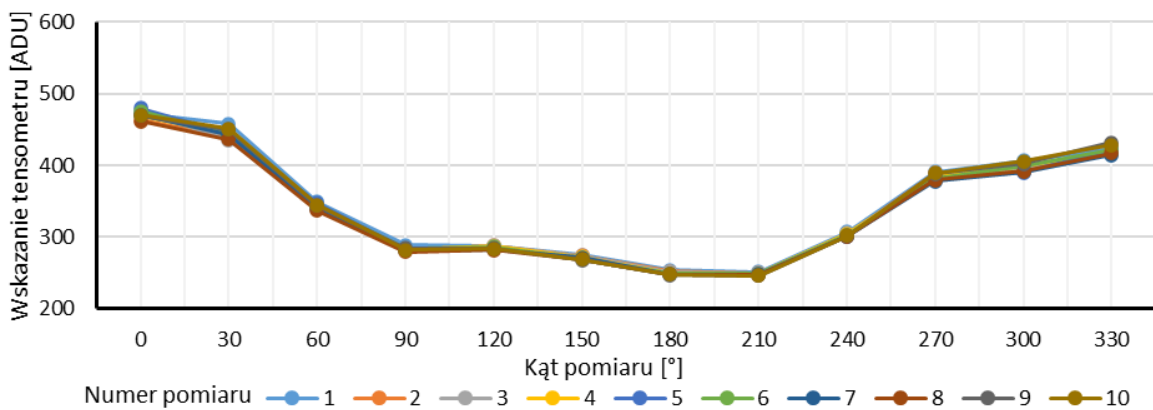
Rys. 5.8. Wartości wskazań przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 71,32 N (oprac. własne)

Najmniejsza wartość średnia przy obciążeniu tensometru ciężarem 71,32 N wyniosła 278,02 ADU dla kąta 210°.



Rys. 5.9. Wartości wskazań przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 81,22 N (oprac. własne)

Najmniejsza wartość średnia przy obciążeniu tensometru ciężarem 81,22 N wyniosła 258,68 ADU dla kąta 210°.



Rys. 5.10. Wartości wskazań przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 91,37 N (oprac. własne)

W celu porównania różnych systemów pomiarowych, a także do oceny przydatności systemu do danego zadania pomiarowego, w technice stosuje się parametr powtarzalności *EV* (ang. *equipment variation*). Wykorzystano procedurę typową dla przemysłowych systemów pomiarowych, szczegółowo opisaną w pracy (Dietrich i Schultze, 2011).

Według tej procedury obliczono wartość rozrzutu wyników pomiarów dla dwóch różnych położeń kątowych oraz dla dwóch różnych obciążeń, wykonując po 10 powtórzeń. Użyto następującego wzoru:

$$\sum E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (X_{ij} - X_i)^2, \quad (5.22)$$

gdzie: X_i – średnia z pomiarów dla danej serii pomiarów, i – liczba zmiennych, od 1 do n ; w tym przypadku $n = 2$, j – liczba powtórzeń, od 1 do k ; w tym przypadku $k = 10$.

W celu zbadania zależności powtarzalności systemu od położenia kąowego bębna przenośnika, wykorzystano wyniki pomiarów dla dwóch różnych kątów. Obliczenia powtarzalności EV wykonano jeszcze raz z wykorzystaniem wyników pozyskanych dla dwóch różnych obciążeń. Porównanie tych dwóch wartości EV daje pogląd na wagę czynników, wpływających na rozrzut wyników pomiarów.

Tabela 5.2 zawiera wskazania tensometru środkowego, zarejestrowane w różnych położeniach kątowych bębna, natomiast w tabeli 5.3 zestawiono statystyki. Najmniejsza wartość średnia przy obciążeniu tensometru T2 ciężarem 91,37 N wyniosła 248,57 ADU dla kąta 210°. Wszystkie minimalne wartości średnie zawierają się w przedziale kątowym 180°-210°, odpowiada to wywieraniu nacisku taśmy F_n na powierzchnię tensometru w jego środkowej części, tj. położeniu tensometra, w którym jego końce (rys. 4.19b) znajdują się w dolnej nieopasanej części bębna. Największa wartość rozstępu w tej serii pomiarów dla rozpatrywanego obciążenia wynosi 31,18 ADU co stanowi 4,57% maksymalnej wartości 682,63 ADU, zarejestrowanej dla kąta 0° i powtórzenia nr 3.

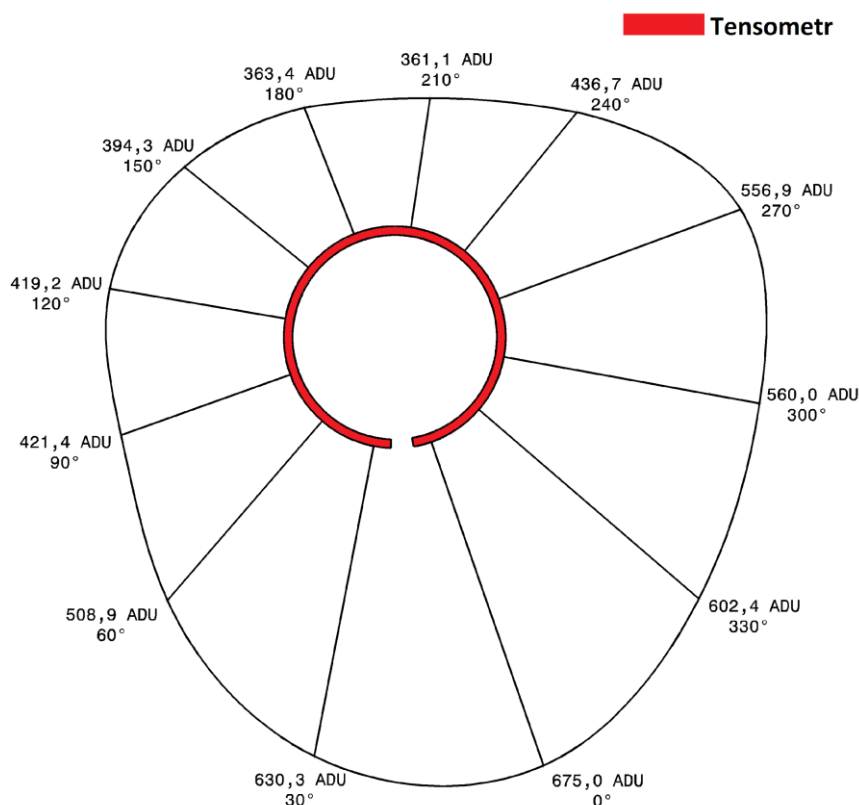
Tab. 5.2. Zarejestrowane wskazania tensometru środkowego T2 [ADU] przy obciążeniu 51,59 N

Kąt / Pomiar	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
1	651,5	625,9	513,7	429,8	425,6	405,8	374,6	369,4	444,2	570,2	562,1	600,4
2	671,0	624,3	513,4	426,8	423,9	399,3	369,4	363,5	442,2	563,2	559,1	598,9
3	682,6	637,5	512,5	426,3	426,2	398,6	360,6	362,1	432,6	555,1	557,7	605,1
4	672,4	628,5	503,0	422,9	419,8	394,9	366,4	362,0	435,3	559,5	560,7	599,5
5	679,5	633,8	503,3	418,0	421,3	392,2	363,6	361,2	435,7	553,5	563,6	597,3
6	674,6	635,5	506,1	417,8	417,3	392,9	363,5	363,9	440,1	557,5	555,2	602,2
7	678,1	627,2	505,8	416,1	413,5	388,5	358,5	358,4	436,0	550,9	559,8	597,9
8	679,6	633,1	518,3	426,9	413,6	393,0	358,3	358,6	433,6	555,3	565,0	611,9
9	681,2	630,2	510,8	412,8	416,1	391,1	361,8	357,2	434,9	553,8	559,5	606,9
10	679,9	626,7	502,2	416,8	414,7	385,9	356,8	354,7	432,4	549,9	557,0	604,1

Tab. 5.3. Analiza statystyczna wskazania tensometru środkowego T2 [ADU] przy obciążeniu 51,59 N

Kąt / Dane	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
Wartość MIN	651,5	624,3	502,2	412,8	413,5	385,9	356,8	354,7	432,4	549,9	555,2	597,3
Wartość MAX	682,6	637,5	518,3	429,8	426,2	405,8	374,6	369,4	444,2	570,2	565,0	611,9
Rozstęp R	31,2	13,2	16,1	17,0	12,8	20,0	17,8	14,7	11,8	20,3	9,8	14,7
Średnia X_i	675,0	630,3	508,9	421,4	419,2	394,2	363,4	361,1	436,7	556,9	560,0	602,4
$u(X)$	9,1	4,5	5,5	5,8	4,9	5,8	5,5	4,2	4,1	6,1	3,0	4,6
$u = \frac{S_p}{\sqrt{n}}$	2,9	1,4	1,8	1,8	1,6	1,8	1,8	1,3	1,3	1,9	1,0	1,5
$U_{0,99}$	7,4	3,7	4,5	4,7	4,0	4,7	4,5	3,4	3,3	5,0	2,4	3,8
$m_x \pm U_{0,99}$	675,0 ± 7,43	630,3 ± 3,65	508,9 ± 4,51	421,4 ± 4,72	419,2 ± 3,98	394,2 ± 4,70	363,4 ± 4,50	361,1 ± 3,38	436,7 ± 3,33	556,9 ± 4,97	560,0 ± 2,44	602,4 ± 3,76

Na rys. 5.11 został graficznie przedstawiony rozkład wartości średnich X_i w zależności od kąta, jaki wskazał inklinometr, odpowiadającego różnym położeniom kątowym bębna podczas pomiarów kalibracyjnych dla obciążenia 51,59 N. Zauważalny jest niesymetryczny charakter wskazań tensometru względem środka odcinka pomiarowego tensometru ($180^\circ \div 210^\circ$).



Rys. 5.11. Średnie wskazania tensometru środkowego T2 dla obciążenia 51,59 N w zależności od położenia kąowego bębna

Zwraca na siebie uwagę fakt, że przy różnych położeniach kątowych bębna zwrotnego wartości rozstępów i odchyłeń standardowych wyników pomiarów znacznie się różnią. Z tego powodu dla oszacowania powtarzalności EV pod uwagę wzięto po 10 powtórzeń dla dwóch różnych kątów, wskazanych w tab. 5.4.

Tab. 5.4. Dane do obliczenia EV z uwzględnieniem wyników dla kątów 0° i 180° [ADU]

Pomiar \ kąt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0°	651,45	671,03	682,63	672,39	679,47	674,59	678,09	679,58	681,16	679,94
180°	444,20	442,15	432,55	435,25	435,65	440,12	435,95	433,62	434,94	432,36

Z obliczeń według procedury (Dietrich i Schultze, 2011) otrzymano wynik powtarzalności pomiaru $EV = 38,82$ ADU. Przyjmując za wartość odniesienia $RF = 675,03$ ADU, która odpowiada średniemu wskazaniu dla kąta 0° , powtarzalność wyrażona procentowo, wynosi:

$$\% EV = \frac{EV}{RF} \cdot 100 \% = 5,8 \%, \quad (5.23)$$

Powtarzalność na poziomie poniżej 10% należy uznać za bardzo dobry wynik, potwierdzający przydatność danego systemu pomiarowego do zamierzonych celów.

Jak się okazało, rozrzut wyników pomiarów w warunkach powtarzalności zależy również od obciążenia, działającego na tensometr. Pozyskane wskazania tensometru T2 dla różnych obciążeń są zestawione w tab. 5.5 i tab. 5.6, a ich wartości średnie umieszczono na wykresie obok krzywej aproksymacyjnej na rys. 5.12. Należy odnotować, że podczas obciążenia taśmy masą poniżej 6 kg czułość tensometrów jest wysoka, zaś w przedziale 6-8 kg spada do 27 ADU/kg, a w przedziale 8-9 kg nawet do 10 ADU/kg. Jednak niepewność 1,5 ADU w tym ostatnim przedziale o najmniejszej czułości nadal pozwala traktować wynik pomiaru jako użyteczny z punktu widzenia monitoringu obciążenia taśmy przenośnika.

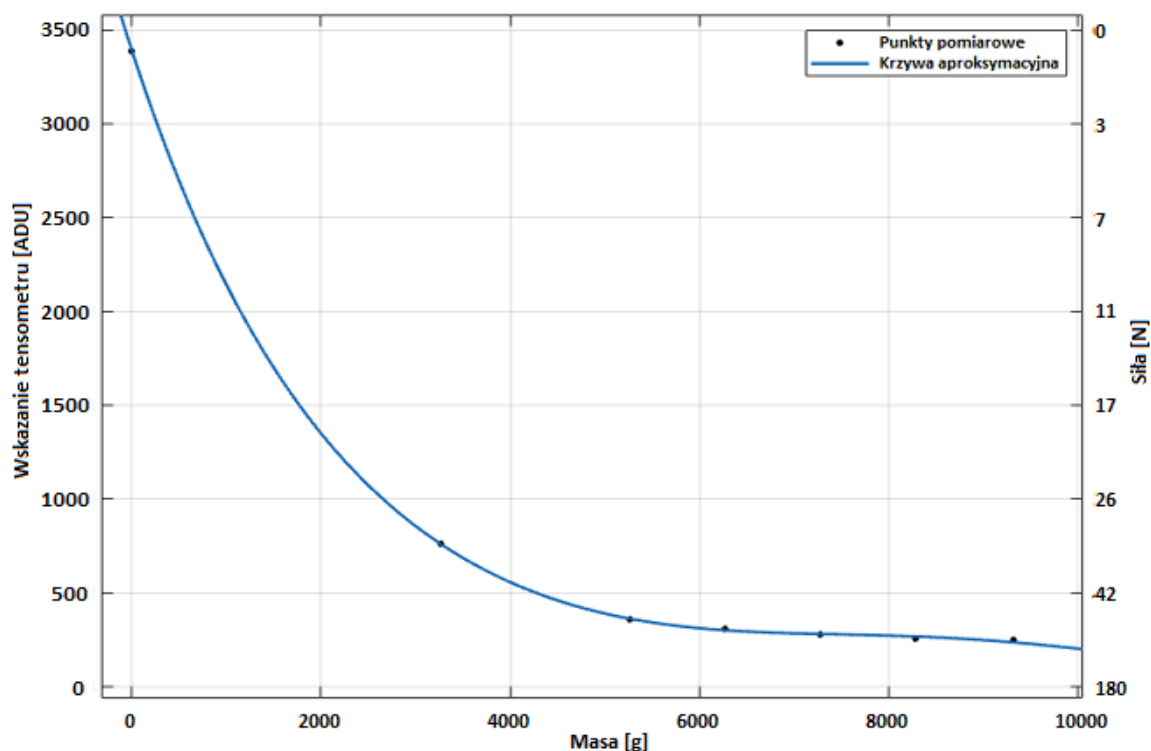
Tab. 5.5. Wskazania [ADU] dla sześciu wzorców masy, tens. środkowy T2, kąt 180° - 210°

Numer pomiaru	$m_{k1} = 3268$ g	$m_{k2} = 5261$ g	$m_{k3} = 6270$ g	$m_{k4} = 7273$ g	$m_{k5} = 8282$ g	$m_{k6} = 9317$ g
1	747,81	369,40	321,07	278,94	259,66	251,53
2	754,18	363,54	315,27	279,59	258,45	249,40
3	755,86	362,08	312,79	278,16	260,37	249,62
4	766,50	361,96	311,06	278,40	260,03	248,90
5	749,52	361,17	313,13	277,84	259,25	248,86
6	761,70	363,90	311,06	277,26	258,59	249,10
7	767,35	358,37	310,59	277,89	257,93	248,32
8	762,18	358,58	309,76	277,76	256,82	247,16
9	771,50	357,18	308,45	277,35	256,52	246,18
10	763,52	354,67	308,51	276,97	259,21	246,62

Tab. 5.6. Niepewność pomiaru [ADU] dla sześciu wzorców masy, tens. środkowy T2, kąt 180°-210°

Masa / Dane	$m_{k1} = 3268 \text{ g}$	$m_{k2} = 5261 \text{ g}$	$m_{k3} = 6270 \text{ g}$	$m_{k4} = 7273 \text{ g}$	$m_{k5} = 8282 \text{ g}$	$m_{k6} = 9317 \text{ g}$
Wartość MIN	747,81	354,67	308,45	276,97	256,52	246,18
Wartość MAX	771,50	369,40	321,07	279,59	260,37	251,53
Rozstęp R	23,69	14,73	12,61	2,62	3,86	5,34
Średnia X_i	760,01	361,09	312,17	278,02	258,68	248,57
$u(X)$	7,87	4,15	3,77	0,80	1,29	1,58
$u = \frac{S_p}{\sqrt{n}}$	2,49	1,31	1,19	0,25	0,41	0,50
$U_{0,99}$	6,41	3,38	3,07	0,65	1,05	1,29
$m_x \pm U_{0,99}$	$760,01 \pm 6,41$	$361,09 \pm 3,38$	$312,17 \pm 3,07$	$278,02 \pm 0,65$	$258,68 \pm 1,05$	$248,57 \pm 1,29$

Model matematyczny w postaci funkcji aproksymacyjnej krzywą Gaussa, widoczny na rys. 5.11, pozwolił na zmniejszenie maksymalnego błędu przybliżenia wartości do poziomu 4,39 %.



Rys. 5.12. Krzywa aproksymacyjna wyników kalibracji (Gausa) (oprac. własne)

Dobre doświadczenie współczynniki przedstawia wzór funkcji:

$$f(x) = 1,0863 \cdot 10^{18} \cdot \text{EXP} \left(- \left(\frac{x + 1,4569 \cdot 10^5}{2,5209 \cdot 10^4} \right)^2 \right) + 203,5910 \cdot \text{EXP} \left(- \left(\frac{x - 8,6758 \cdot 10^3}{3,3738 \cdot 10^3} \right)^2 \right). \quad (5.25)$$

Jak widać z tabeli 5.6, odchylenie standardowe rozrzutu wyników może się różnić kilkakrotnie dla różnych obciążeń, np. jest prawie dziesięciokrotnie większe dla $m_{k1} = 3268$ g niż dla $m_{k4} = 7273$ g. W związku z tym dla oszacowania powtarzalności EV spośród wyników z przedziału $180^\circ - 210^\circ$ wzięto po 10 powtórzeń dla dwóch różnych mas. Dane te są umieszczone w tab. 5.7

Tab. 5.7. Wyniki powtórzeń [ADU] dla mas m_{k4} i m_{k6}

Numer pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_{k1} = 3268$ g	278,94	279,59	278,16	278,4	277,84	277,26	277,89	277,76	277,35	276,97
$m_{k6} = 9317$ g	251,53	249,4	249,62	248,9	248,86	249,1	248,32	247,16	246,18	246,62

Z obliczeń otrzymano wynik $EV = 29,25$ ADU. Przyjmując za wartość odniesienia $RF = 760,01$ ADU, która odpowiada średniemu wskazaniu dla masy 3268 g, powtarzalność, wyrażona procentowo, wynosi:

$$\% EV = \frac{EV}{RF} \cdot 100 \% = 3,8 \%. \quad (5.24)$$

Należy odnotować, że powtarzalność badanego tensometrycznego systemu pomiarowego zależy zarówno od kąтового położenia bębna zwrotnego, jak i od obciążenia taśmy. Z badań wynika, że większe rozrzuty są spowodowane zmianą położenia kąтового niż zmianą obciążenia. Oznacza to, że w badaniach, realizowanych w przyszłości, a także w zastosowaniach praktycznych konieczna będzie identyfikacja kąтового położenia bębna w każdym pomiarze. W niniejszym programie badań ograniczymy się tym, że jako najbardziej miarodajny wynik dla punktów charakterystycznych analizowana będzie najniższa wartość wskazań.

Tabela 5.8 przedstawia wyniki pomiarów oraz poszczególne wartości przed oraz po aproksymacji wraz z wartością procentową błędu aproksymacji.

Tab. 5.8. Błąd aproksymacji

Masa kalibracyjna $m_{k0} - m_{k6}$ [g]	Wartości zmierzone [ADU]	Wartości aproksymowane [ADU]	Wartości aproksymowane [N]	Błąd aproksymacji [ADU]	Błąd aproksymacji [%]
0	3390	3392,26	0	-2,26	-0,07%
3268	760,01	761,02	32,05	-1,01	-0,13%
5261	361,08	364,11	51,59	-3,03	-0,84%
6270	312,17	302,35	61,49	9,82	3,15%
7273	278,02	282,45	71,32	-4,44	-1,60%
8282	258,68	269,13	81,22	-10,45	-4,04%
9317	248,57	237,66	91,37	10,91	4,39%

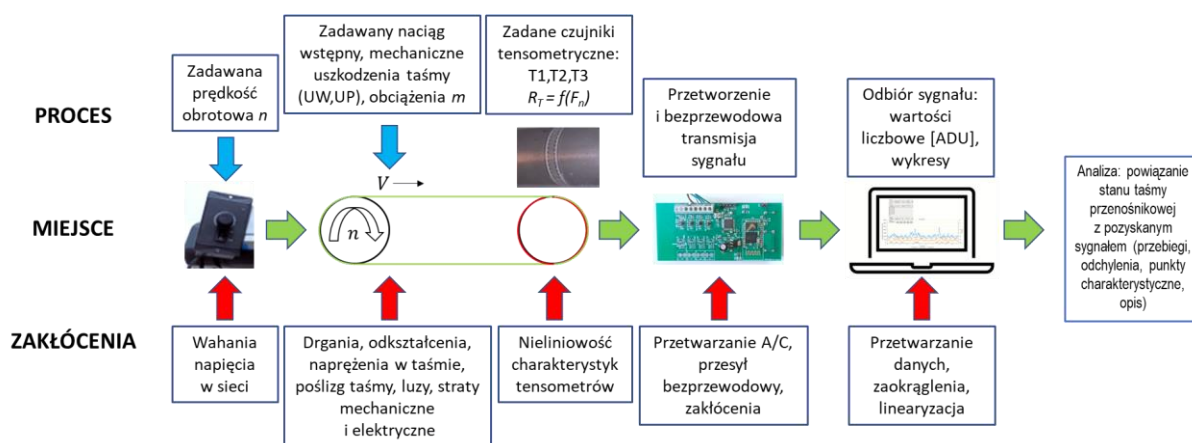
Wyniki, zebrane w tabelach 5.6 i 5.8, pokazują, że niepewności pomiarów dla prawdopodobieństwa $p = 0,99$ mieszczą się w granicach ok. 1 % mierzonej wartości, zaś błąd aproksymacji dla całego zakresu obciążeń od zera do 9317 g wynosi mniej niż 4,4 %, co można uznać za wynik dobry.

Podsumowując, w wyniku kalibracji oraz na podstawie szacowania niepewności i obliczeń powtarzalności EV uzyskano potwierdzenie przydatności systemu do monitorowania nacisku taśmy F_n na bęben przenośnika. Rozkład wyników, uzyskanych w warunkach powtarzalności, jest zbliżony do

normalnego, co uprawnia do szacowania niepewności metodą typu A. Największa wartość niepewności rozszerzonej dla poziomu ufności 99 % wyniosła 7,44 ADU. Powtarzalność systemu pomiarowego z uwzględnieniem różnych kątów wyniosła $EV = 38,82$ ADU, a dla różnych mas obciążenia $EV = 29,25$ ADU. W wyrażeniu procentowym powtarzalność EV nie przekroczyła 10 %, co odpowiada wymaganiom, stawianym nowym systemom pomiarowym (Dietrich i Schultze, 2011).

5.2. Badania taśmy przenośnikowej

Do głównych zadań podczas badania obiektów w celu zdefiniowania właściwości mechanicznych oraz weryfikacji założeń konstrukcyjnych należą pomiary sił i przemieszczeń, a także odkształceń. Odpowiedni wybór przyrządów i układów badawczych jest szczególnie istotny dla poprawności otrzymywanych wyników badań, jak również odniesienia ich do systemów jakości. Odpowiednie normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 unifikują szeroki zakres zagadnień funkcjonujących w laboratoriach oraz przemyśle PN-EN ISO 9000:2015. Jednolite procedury badawcze umożliwiają porównanie i odniesienie wyników do wcześniej wykonanych wzorców (Kowalewski i Szymczak, 2013). W niniejszej rozprawie obiektem badań był system tensometryczny przeznaczony do monitorowania pracy taśm przenośnikowych w czasie rzeczywistym. Przebieg badań, schematycznie ukazany poniżej na rys. 5.12, szczegółowo opisano w dalszej części rozdziału.



Rys. 5.13. Przebieg badań systemu monitorującego stan taśmy przenośnikowej (oprac. własne)

W systemie wykorzystano czujniki tensometryczne, w których rezystancja R_T zależy bezpośrednio od wypadkowej siły nacisku taśmy F_n . Podczas badań dynamicznych taśmy przenośnikowej rys. 5.13 nastawiana jest prędkość obrotowa n bębna napędowego, a zarejestrowane przebiegi sygnałów z tensometrów są zależne od naciągu wstępnego taśmy, uszkodzeń wzdłużnych UW i poprzecznych UP oraz obciążenia m . Dokładność realizacji zadanej prędkości obrotowej będzie zależała od charakterystyk silnika, a także zasilania, w którym mogą występować zakłócenia. Czujniki tensometryczne posiadają nieliniową charakterystykę oraz istnieje nieliniowa zależność wskazań w zależności od miejsca nacisku taśmy na tensometr paskowy opasający wałek. Układ elektroniczny ADC odbiera dane analogowe i przetwarza na cyfrowe, a następnie przesyła przy pomocy transmisji bluetooth do komputera. Na etapie zamiany wartości analogowych na cyfrowe dochodzi do dyskretyzacji sygnału, a jego wartości są mierzone z częstotliwością 200 Hz. Innym źródłem zakłócenia na tym etapie jest bezprzewodowa transmisja bluetooth. Sygnał, który w cyfrowej postaci trafia do komputera, jest przedstawiany w jednostkach ADU (ang. *analog-to-digital units*), a pozyskane wartości podlegają zaokrągleniu i linearyzacji. Ponadto przebiegi zmian są wizualizowane w celu ułatwienia dalszej analizy, tak aby uniknąć dodatków kolejnych procedur aproksymacji i przeliczania na wartości siły w [N]. Przeliczeń takich dokonano dopiero na końcowym

etapie analizy. Głównym celem analizy pozyskanych przebiegów sygnałów jest powiązanie zadanych zmiennych wejściowych (prędkość, obciążenie, uszkodzenie) z charakterem przebiegu sygnału na wyjściu (odchylenia, punkty charakterystyczne, wartości skrajne). Szczegółowy opis tych powiązań umożliwia dalszą procedurę identyfikacji stanu monitorowanej taśmy, w tym z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i algorytmów uczenia maszynowego.

W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki badań statycznych oraz dynamicznych taśm przenośnikowych. W pierwszej kolejności wykonano 10 pomiarów naciągu taśmy nr 1 na wałkach przenośnika dla dowolnego jej kąтового położenia względem tensometrów. Następnie dla prędkości $n_1 = 159$ obr/min wykonano cztery pomiary dynamiczne naciągu, badając wskazania tensometrów podczas ruchu nieobciążonej taśmy. Następnym etapem badań było wykonanie pomiarów nacisku taśmy F_n na bęben podczas jej obciążenia odważnikami $m_{t0,5} = 0,5$ kg, $m_{t1} = 1$ kg, $m_{t2} = 2$ kg, $m_{t3} = 3$ kg oraz $m_{t5} = 5$ kg w trzech różnych strefach odpowiadających położeniu tensometrów uprzednio naklejonych na wałku zwrotnym przenośnika. Dla każdego z pięciu obciążeń pomiar powtórzono pięciokrotnie dla trzech stref taśmy oraz trzech różnych prędkości obrotowych pracy przenośnika tj. $n_1 = 159$ obr/min, $n_2 = 318$ obr/min oraz $n_3 = 540$ obr/min. Sumarycznie zebrano 225 wyników dla taśmy nr 1.

Kolejnym etapem było wykonanie siedmiu różnych uszkodzeń taśmy przenośnikowej wykonywanych dwuetapowo oraz podjęcie próby identyfikacji danego uszkodzenia przez układ pomiarowy i zaznaczenia poszczególnej wady na wykresach. Badania wykonano dla tych samych trzech prędkości, jak dla obciążenia taśmy oraz prędkości serwisowej $n_0 = 80$ obr/min dla pierwszego etapu uszkodzenia, dla taśmy przenośnikowej nr 1. Każdy pomiar powtórzono 10 razy, tak żeby taśma posiadająca niezgodności minimum dwa razy opasała bęben z układem pomiarowym. Pozwoliło to na zebranie oraz zobrazowanie charakterystyk uszkodzeń z każdego etapu ich wykonania.

Wszystkie opisane powyżej badania zostały wykonane ponownie dla taśmy nr 2. Jedyną różnicą polegała na pominięciu pomiaru przy prędkości $n_0 = 80$ obr/min, przy czym od razu w jednym etapie wykonano pięć podobnych uszkodzeń taśmy nr 2, takich, jak wcześniej w dwóch etapach dla taśmy nr 1. Końcowy etap badań obejmował dwa poprzeczne nacięcia dla taśmy 1 oraz 2. W tym przypadku wykonano po pięć pomiarów dla jednej prędkości $n_1 = 159$ obr/min ze względu na znaczne zróżnicowanie w wartościach w porównaniu do naciągu oraz pozostałych uszkodzeń. Zostało to dokładnie przedstawione w dalszej części pracy. Otrzymano w ten sposób łącznie 490 charakterystyk, na których uszkodzenie pojawiało się co najmniej dwukrotnie, przekraczając liczbę 980 pojedynczych identyfikowalnych nieciągłości taśmy przenośnikowej.

Ponadto została wykonana seria próbek testowych z materiału badanej taśmy, posiadających taki sam charakter uszkodzeń jak podczas badań dynamicznych. Zerwanie ich na maszynie wytrzymałościowej w trakcie próby statycznego rozciągania pozwoliło na otrzymanie ilościowych oraz jakościowych danych na temat wytrzymałości badanych taśm.

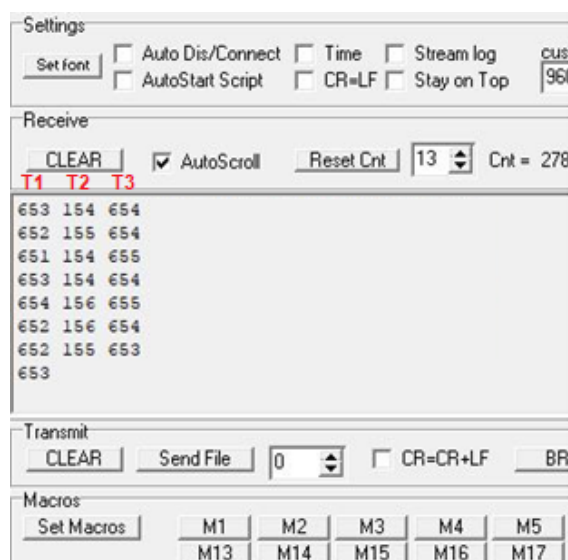
5.2.1. Naciąg taśmy

Taśma nr 1

Przedstawione na rys. 5.14 naciągi taśmy przenośnikowej nr 1 przy losowym kącie położenia tensometrów względem taśmy podczas pomiaru statycznego zawierają wartości dla pierwszego skrajnego tensometru w pierwszej kolumnie ekranu programu, oznaczenie T1. Zmierzone wartości zawierają się pomiędzy $651 \text{ ADU} \approx 35,59 \text{ N}$ a $654 \text{ ADU} \approx 35,48 \text{ N}$. Wyniki dla drugiego skrajnego tensometru są w trzeciej kolumnie okna programu, oznaczenie T3, znalazły się w przedziale od $653 \text{ ADU} \approx 35,52 \text{ N}$ do $654 \text{ ADU} \approx 35,48 \text{ N}$. Różnica w wartościach granicznych pomiędzy

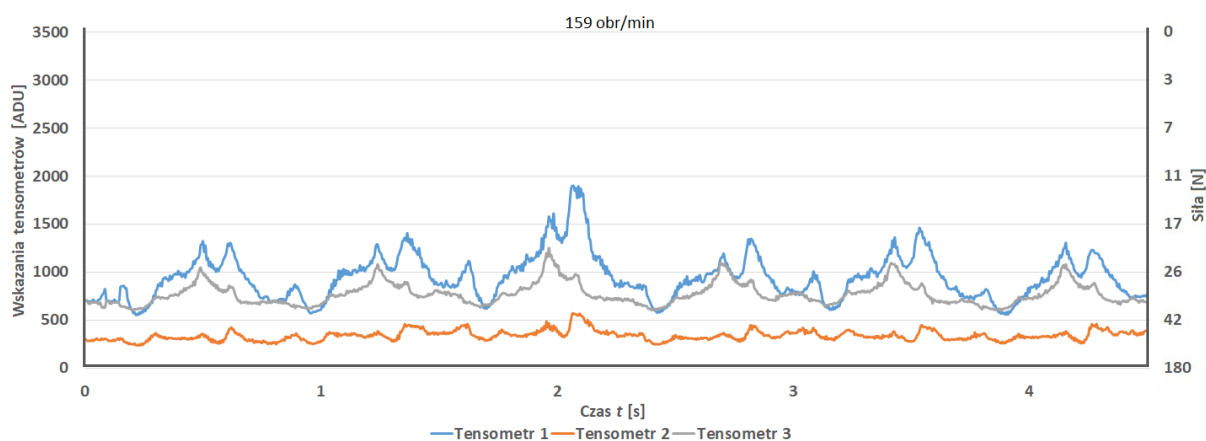
tensometrami wynosi 0,31 %, co świadczy o poprawnie wyregulowanym naciągu taśmy, co powodowało poprawną pracę przenośnika w trakcie pomiarów dynamicznych. Wskazania tensometru T2, umieszczonego na środku bębna, są znacznie niższe, co wynika z charakteru rozkładu nacisków (Bzinkowski i in., 2022).

Należy mieć na uwadze, że mniejsze wskazanie tensometru w jednostkach ADU odpowiada większemu naciskowi F_n taśmy na tensometr. Cztery przebiegi, powtórzone dla prędkości $n_I = 159$ obr/min, przedstawiono na wykresach na rys. 5.15-5.18, a najmniejsze zarejestrowane wartości x_{min} z każdego przebiegu zebrano w tabeli 5.9. Obliczono też średnie wartości $\overline{x_{min}}$.



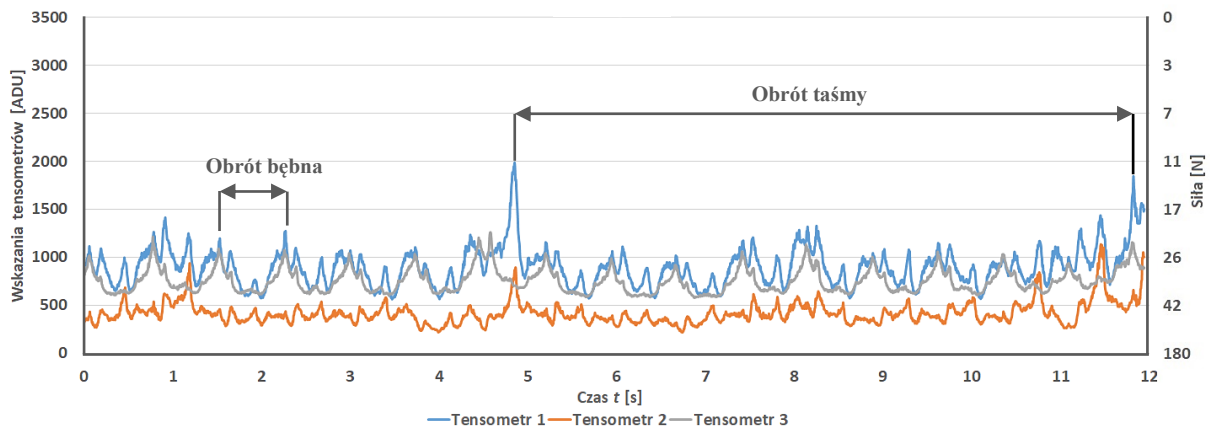
Rys. 5.14. Widok ekranu podczas badania naciągu taśmy 1, pomiary stat. (*Program Terminal*, 2023)

Najmniejsza zmierzona wartość dla tensometru T1 w trakcie pomiaru, którego przebieg przedstawia rys. 5.15, wynosi 553 ADU $\approx 39,46$ N. Natomiast dla tensometru T3 minimalna wartość znalazła się na poziomie 594 ADU $\approx 37,74$ N. Rozbieżność zmierzonych wartości sięga 4,5 %.



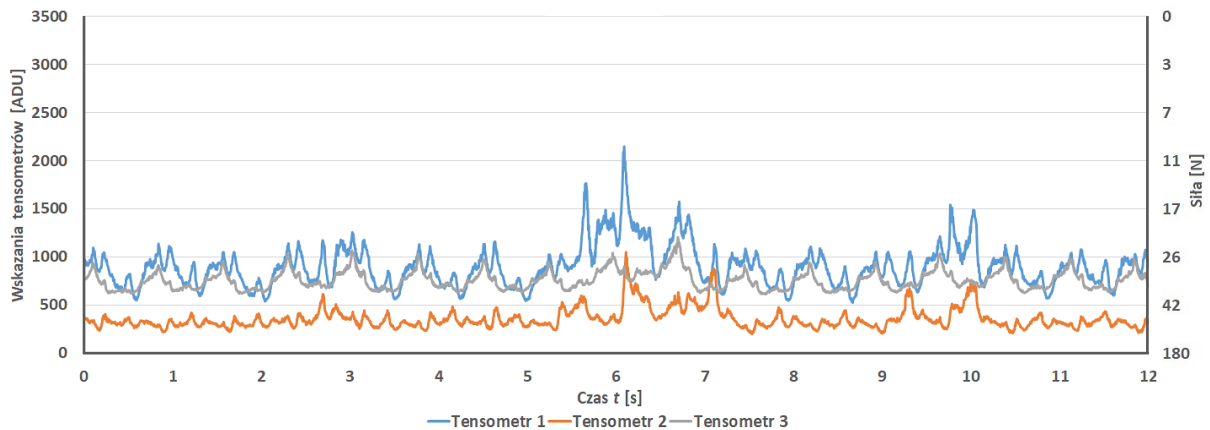
Rys. 5.15. Naciąg taśmy nr1 przy prędkości $n_I = 159$ obr/min, przebieg pierwszy (oprac. własne)

Dla kolejnego pomiaru naciągu taśmy (przebieg drugi, rys. 5.16) najmniejsza zmierzona wartość dla tensometru T1 wynosi odpowiednio 564 ADU $\approx 38,98$ N natomiast dla tensometru T3 pomiar wskazał minimalną wartość na poziomie 580 ADU $\approx 38,27$ N. Różnica pomiędzy wskazaniami tensometrów wynosi 1,8 %. Na wykresie zaznaczono charakterystyczne punkty przebiegu sygnału, takie jak obrót bębna oraz wskazania informujące o pełnym obrocie taśmy przenośnikowej.



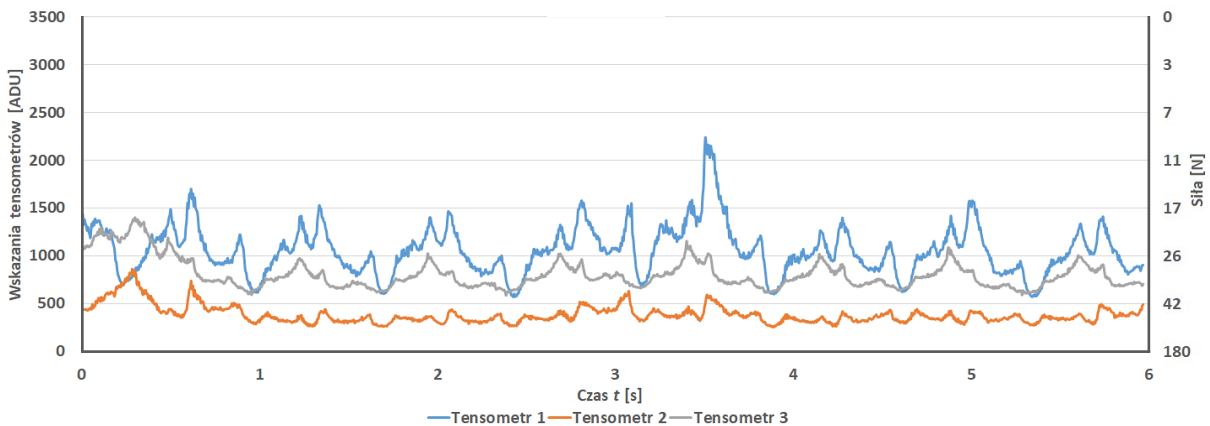
Rys. 5.16. Naciąg taśmy nr1 przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min, przebieg drugi (oprac. własne)

Następne pomiary naciągu taśmy wykonano podczas przebiegu 3, wyniki pokazano na rys. 5.17. Najmniejsza zmierzona wartość dla tensometru T1 wynosi odpowiednio $527 \text{ ADU} \approx 40,65 \text{ N}$, natomiast dla tensometru T3 na poziomie $577 \text{ ADU} \approx 38,43 \text{ N}$. Różnica pomiędzy wskazaniami znacząco wzrosła i stanowi $5,8 \%$.



Rys. 5.17. Naciąg taśmy nr1 przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min, przebieg trzeci (oprac. własne)

Kolejne wyniki pomiaru naciągu taśmy są podczas czwartego przebiegu ukazano na rys. 5.18. Najmniejsza zmierzona wartość dla tensometru T1 wynosi odpowiednio $555 \text{ ADU} \approx 39,36 \text{ N}$ natomiast dla tensometru T3 minimalna wartość znalazła się w przedziale $585 \text{ ADU} \approx 38,10 \text{ N}$. Różnica pomiędzy wskazaniami była znowu nieco mniejsza i wyniosła $3,3 \%$.



Rys. 5.18. Naciąg taśmy nr1 przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min, przebieg czwarty (oprac. własne)

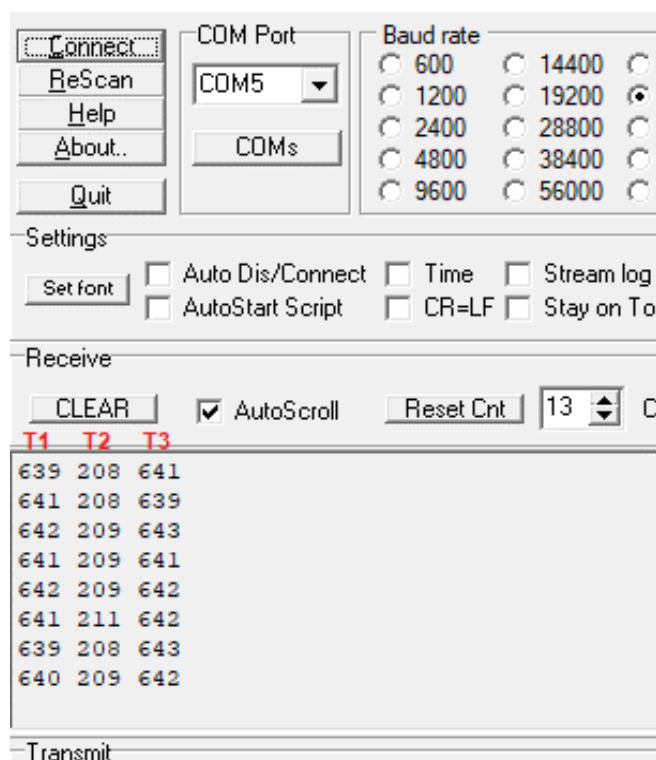
Tab. 5.9. Zestawienie wyników pomiarów dynamicznych naciągu taśmy 1 – najmniejsze zarejestrowane wartości

Nr przebiegu	Tensometr T1, x_{min}	Tensometr T3, x_{min}
1	553 ADU \approx 39,46 N	594 ADU \approx 37,74 N
2	564 ADU \approx 38,98 N	580 ADU \approx 38,27 N
3	527 ADU \approx 40,65 N	577 ADU \approx 38,43 N
4	555 ADU \approx 39,36 N	585 ADU \approx 38,10 N
Średnia $\overline{x_{min}}$	550 ADU \approx 39,59 N	584 ADU \approx 38,14 N

Na podstawie wyżej opisanych pomiarów można zauważyć, że średnio różnica wskazań naciągu pomiędzy skrajnymi tensometrami T1 oraz T3 podczas pomiarów dynamicznych wynosi 3,9%.

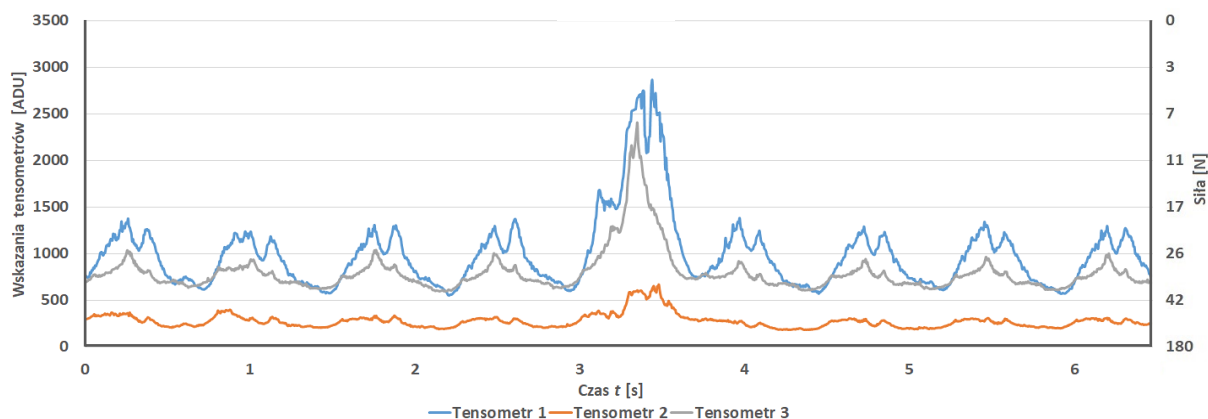
Taśma nr 2

Na rys. 5.19 przedstawiono zrzut ekranu ze wskazaniem naciągów taśmy przenośnikowej nr 2 przy losowym kącie położenia tensometrów względem taśmy podczas pomiaru statycznego. Wartości dla pierwszego skrajnego tensometru znajdują się w pierwszej kolumnie okna programu i są oznaczone T1. Zakres wskazań tensometru T1 mieści się pomiędzy 639 ADU \approx 36,02 N a 642 ADU \approx 35,91 N, zaś drugiego skrajnego tensometru (trzecia kolumna programu oznaczona T3) od 639 ADU \approx 36,02 N do 643 ADU \approx 35,87 N. Różnica w wartościach granicznych pomiędzy tensometrami wynosi 0,42 % co świadczy o poprawnym wyregulowaniu naciągu taśmy. Zarejestrowano cztery przebiegi dla prędkości $n_1 = 159$ obr/min, a zarejestrowane wartości przedstawiono graficznie na rys. 5.20-5.23.



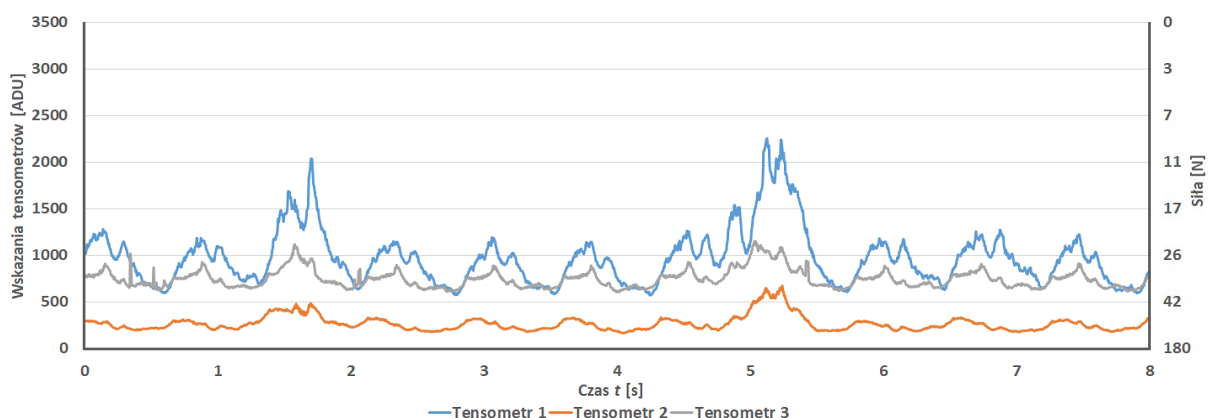
Rys. 5.19. Widok ekranu podczas badania naciągu taśmy 2, pomiary statyczne (Program Terminal, 2023)

Najmniejsza zmierzona wartość dla tensometru T1 w trakcie pomiaru (przebieg pierwszy, rys. 5.20) wynosi 550 ADU \approx 39,59 N. Dla tensometru T3 zarejestrowano najmniejsze wskazanie 598 ADU \approx 37,57 N. Różnica wynosi 5,4 %.



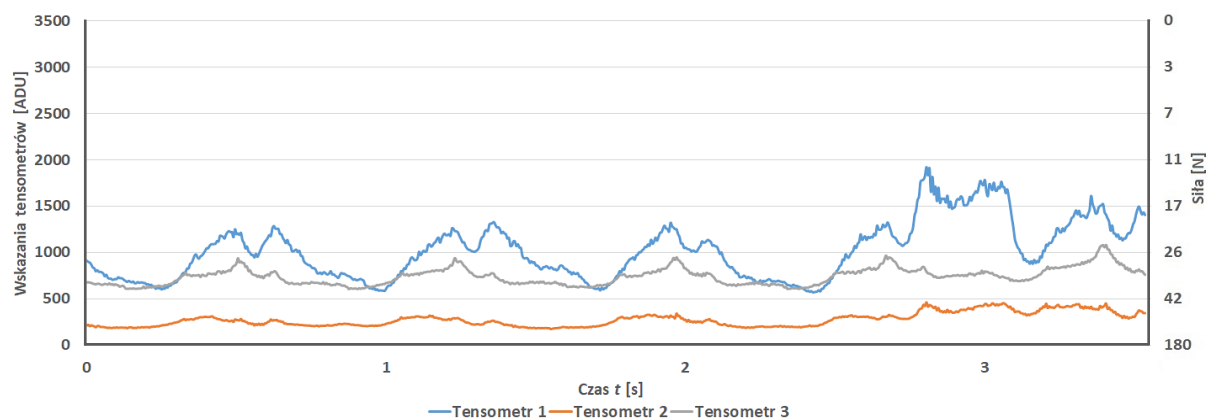
Rys. 5.20. Naciąg taśmy nr 2, $n_l = 159$ obr/min, przebieg pierwszy (oprac. własne)

Dla kolejnego pomiaru naciągu taśmy (rys. 5.21) najmniejsza zmierzona wartość dla tensometru T1 wynosi odpowiednio 567 ADU \approx 38,84 N natomiast dla tensometru T3 pomiar wskazał minimalną wartość na poziomie 607 ADU \approx 37,22 N, co stanowi 3 % różnicy pomiędzy wskazaniem.



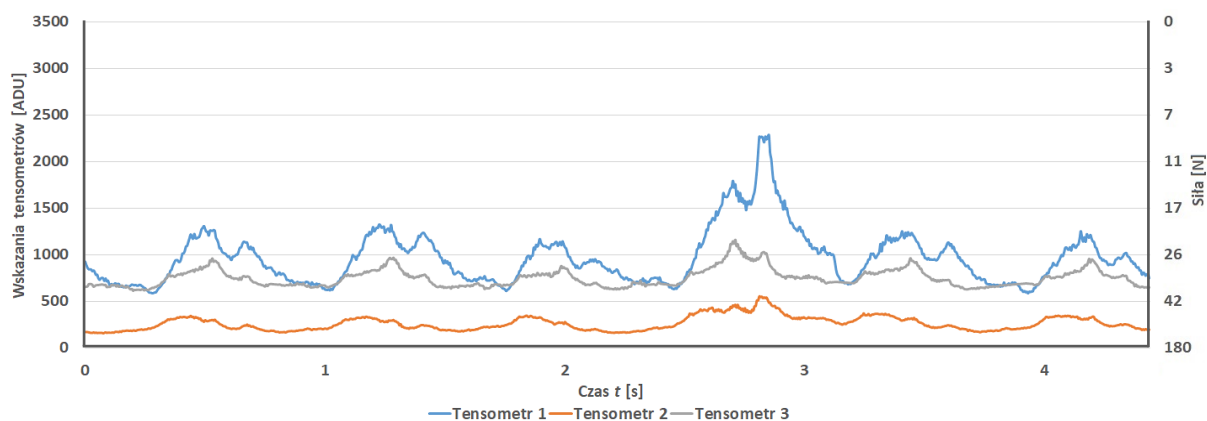
Rys. 5.21. Naciąg taśmy nr 2, $n_l = 159$ obr/min, przebieg drugi (oprac. własne)

Podczas następnego pomiaru naciągu taśmy najmniejsza zarejestrowana wartość dla tensometru T1 wynosi odpowiednio 576 ADU \approx 38,47 N, jak widać na rys. 5.22. Tymczasem dla tensometru T3 pomiar wskazał minimalną wartość na poziomie 611 ADU \approx 37,07 N co daje różnicę pomiędzy wskazaniem 3,8%.



Rys. 5.22. Naciąg taśmy nr 2, $n_l = 159$ obr/min, przebieg trzeci (oprac. własne)

Wyniki ostatniego pomiaru naciągu taśmy nr 2 podczas czwartego przebiegu ukazano na rys. 5.23. Najmniejsza zarejestrowana wartość dla tensometru T1 wynosi 554 ADU \approx 39,41 N, natomiast dla tensometru T3 było to 603 ADU \approx 37,37 N. Różnica wyniosła 5,5 %, podobnie jak w przebiegu pierwszym. Wartości najmniejszych wskazań tensometrów x_{min} dla taśmy nr 2 zebrano w tabeli 5.7, obliczono też średnie wartości ($\overline{x_{min}}$).



Rys. 5.23. Naciąg taśmy nr 2, $n_2 = 159$ obr/min, przebieg czwarty (oprac. własne)

Tab. 5.10. Zestawienie wyników pomiarów dynamicznych naciągu taśmy 2 – najmniejsze zarejestrowane wartości

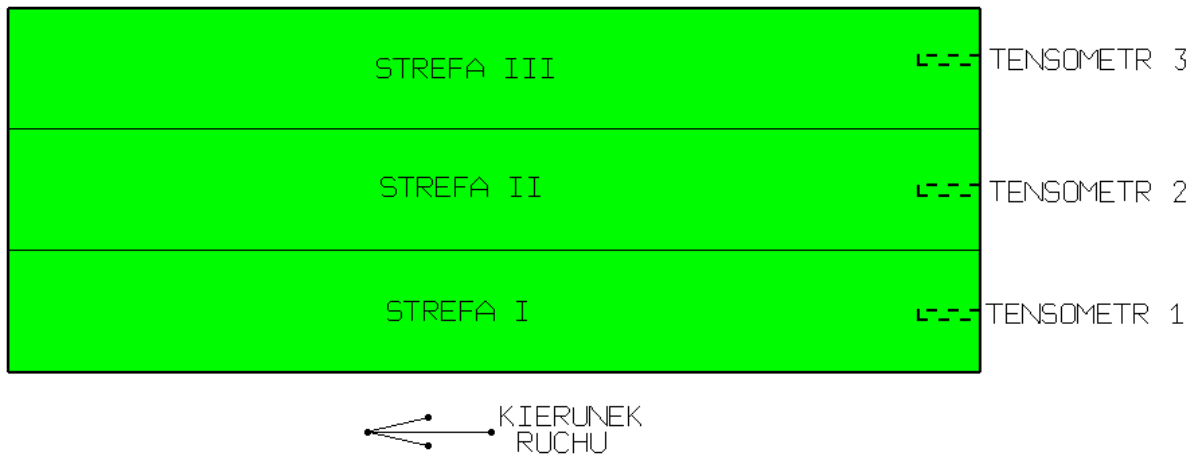
Nr pomiaru	Tensometr T1, x_{min}	Tensometr T3, x_{min}
1	550 ADU \approx 39,59 N	598 ADU \approx 37,57 N
2	567 ADU \approx 38,84 N	607 ADU \approx 37,22 N
3	576 ADU \approx 38,47 N	611 ADU \approx 37,07 N
4	554 ADU \approx 39,41 N	603 ADU \approx 37,37 N
Średnia $\overline{x_{min}}$	562 ADU \approx 39,06 N	605 ADU \approx 37,29 N

Na podstawie zebranych wyników pomiarów w tab. 5.10, można zauważyć, że średnio różnica pomiędzy wskazaniami skrajnych tensometrów T1 oraz T3 dla taśmy nr 2 podczas ruchu z prędkością obrotową bębna $n_1 = 159$ obr/min wynosi 4,4 %. Ze względu na to, że podobne różnice uzyskano również dla taśmy nr 1, a w sumie wykonano 8 powtórzeń, można przyjąć, że zauważone zróżnicowanie jest cechą charakterystyczną monitorowanego systemu. Wynika to z dynamicznego charakteru zmian naprężeń w materiale taśmy podczas jej ruchu. Występujące wartości nadmierne dla pomiarów dynamicznych obrazują miejsce łączenia taśmy charakteryzujące się innymi właściwościami w odniesieniu do części taśmy bez korbów. Na podstawie wyżej wskazanych pomiarów można zauważyć, że średnia wartość różnicy naciągu pomiędzy skrajnymi tensometrami T1 oraz T3 z naciągu podczas pomiarów dynamicznych wynosi dla taśmy nr 1 3,9 % przy maksymalnej różnicy 5,8 % oraz 4,4 % dla taśmy nr 2 przy maksymalnej różnicy 5,5 %. Wyniki pomiarów statycznych jak i dynamicznych naciągu taśm nr 1 oraz nr 2 mieszczą się w 6 % najmniejszej zarejestrowanej wartości wskazań, która oznacza największy nacisk F_n na tensometr. Zaprezentowane wyniki pomiarów dla jednej i drugiej taśmy, zarówno statyczne, jak i dynamiczne, umożliwiają precyzyjną regulację naciągu taśmy przenośnika zapewniając jego bezkolizyjną pracę. Na podstawie przeprowadzonych badań i przeanalizowanych wyników można wnioskować, że tensometryczny układ pomiarowy daje możliwość monitorowania w czasie rzeczywistym siłę nacisku taśmy na bęben.

5.2.2. Monitorowanie taśmy obciążonej

Obciążenie taśm przenośnikowych zostało wykonane dla trzech różnych prędkości obrotowych $n_1 = 159$ obr/min, $n_2 = 318$ obr/min i $n_3 = 540$ obr/min oraz pięciu różnych obciążań $m_{t0,5} = 0,5$ kg, $m_{t1} = 1$ kg, $m_{t2} = 2$ kg, $m_{t3} = 3$ kg i $m_{t5} = 5$ kg w trzech strefach, oznaczonych odpowiednio na rys. 5.24. Szerokość każdej ze stref odpowiadała 1/3 szerokości całkowitej taśmy, przy czym dla dwóch badanych taśm po dokładnym zmierzeniu określono różne wartości całkowitej szerokości w : dla taśmy nr 1 było to 348 mm oraz dla taśmy nr 2 – 346 mm.

Na każdym z wykresów na rys. 5.25-5.69 zaprezentowane zostały wskazania trzech tensometrów podczas monitorowania ruchu dla taśmy nr 2. Wskazana w podpisie pod rysunkiem strefa I, II lub III odzwierciedla miejsce usytuowania ciężarka na taśmie przenośnikowej w chwili badania w stosunku do jednego z tensometrów, jak pokazano na rys. 5.25. Przedstawione zostały wyniki dla charakterystycznych punktów pomiarowych P_c , tj. najmniejsze wartości wskazań [ADU] reprezentujące największy nacisk taśmy F_n dla pojedynczego tensometru znajdującego się w strefie, która była obciążana.



Rys. 5.24. Schemat stref obciążania taśmy (oprac. własne)

Wartości zmierzone dla najmniejszej prędkości $n_1 = 159$ obr/min oraz obciążenia $m_{t0,5} = 0,5$ kg dla obciążenie zawierały się w następujących zakresach:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 590 ADU $\approx 37,88$ N (P_c na rys. 5.25),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 160 ADU $\approx 105,64$ N (P_c na rys. 5.26),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 600 ADU $\approx 37,51$ N (P_c na rys. 5.27).

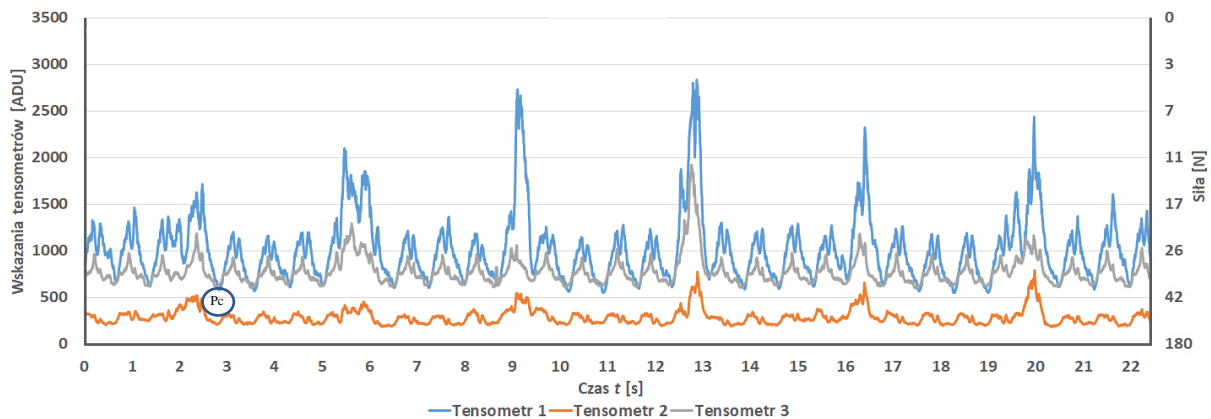
Zwiększenie prędkości do $n_2 = 318$ obr/min spowodowało zauważalny wzrost wartości analizowanego sygnału oraz wzrost najmniejszych rejestrowanych wskazań ADU:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 600 ADU $\approx 37,51$ N (rys. 5.28),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 189 ADU $\approx 100,60$ N (rys. 5.29),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 614 ADU $\approx 36,96$ N (rys. 5.30).

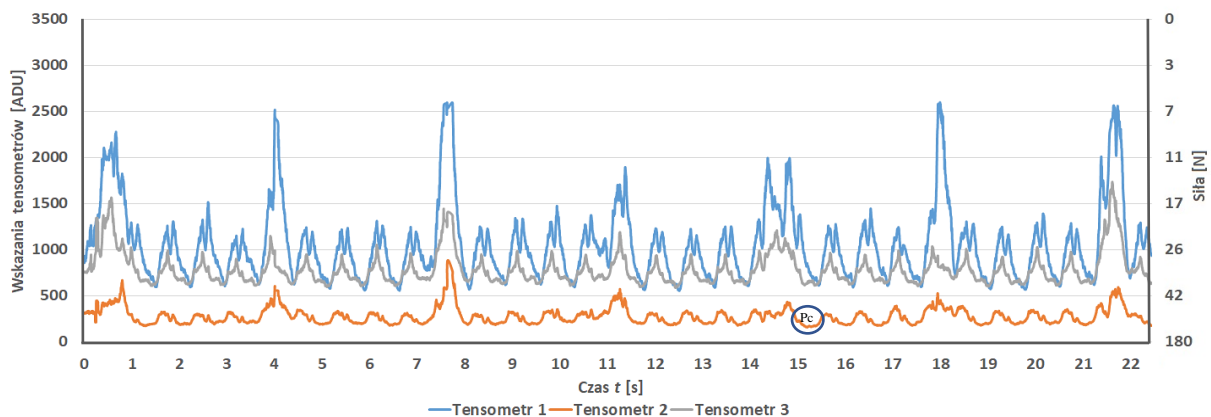
Wyniki otrzymane dla największej prędkości $n_3 = 540$ obr/min powodują dalszy wzrost wskazań, który przedstawiał się następująco:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 619 ADU $\approx 36,76$ N (rys. 5.31),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 210 ADU $\approx 96,91$ N (rys. 5.32),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 632 ADU $\approx 36,28$ N (rys. 5.33).

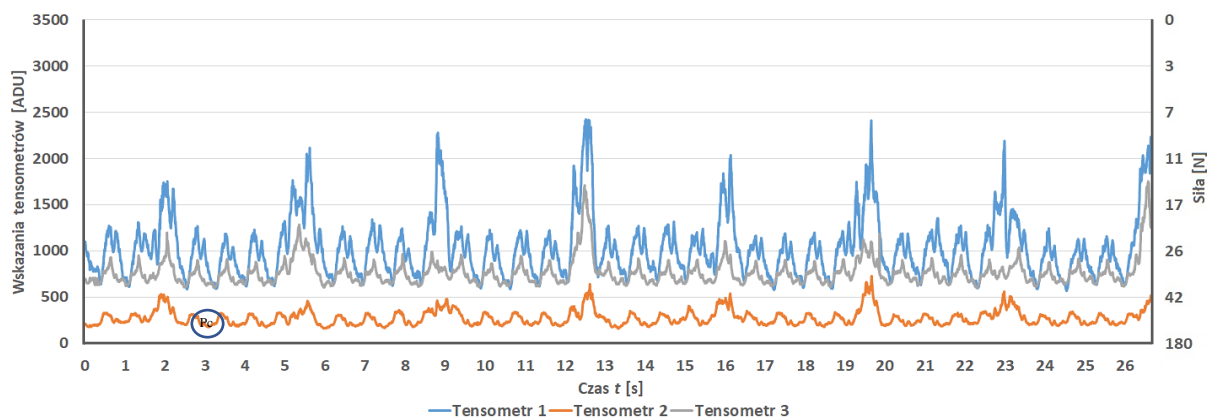
Zauważalną cechą układu pomiarowego jest również oczekiwana zmiana wskazań polegająca na wzroście wartości [ADU] skrajnych tensometrów w odniesieniu do obciążania strefy środkowej w chwili, gdy obciążenie było przykładane w jednej ze skrajnych stref przeciwnych do rozpatrywanego tensometru. Na wykresach można zaobserwować ten efekt jako wzrost najmniejszych wartości [ADU] pojawiający się odpowiednio kolorem niebieskim dla tensometru T1, gdy obciążana była strefa odpowiadająca tensometrowi T3 oraz szarym dla tensometru T3, gdy obciążana była strefa odpowiadająca położeniu tensometru T1. Zaobserwowany efekt pozwala na określenie położenia obciążenia w jednej ze wydzielonych stref taśmy przenośnikowej.



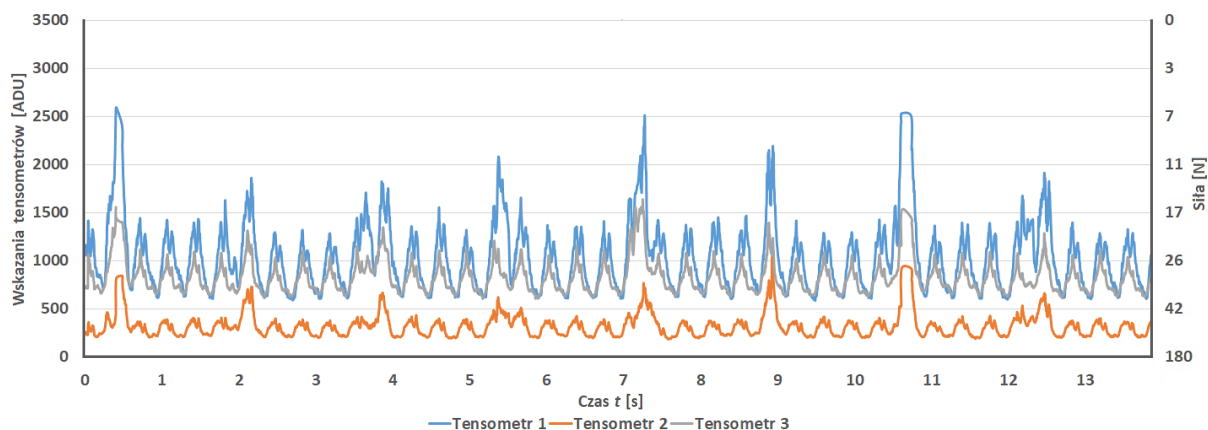
Rys. 5.25. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie I, $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



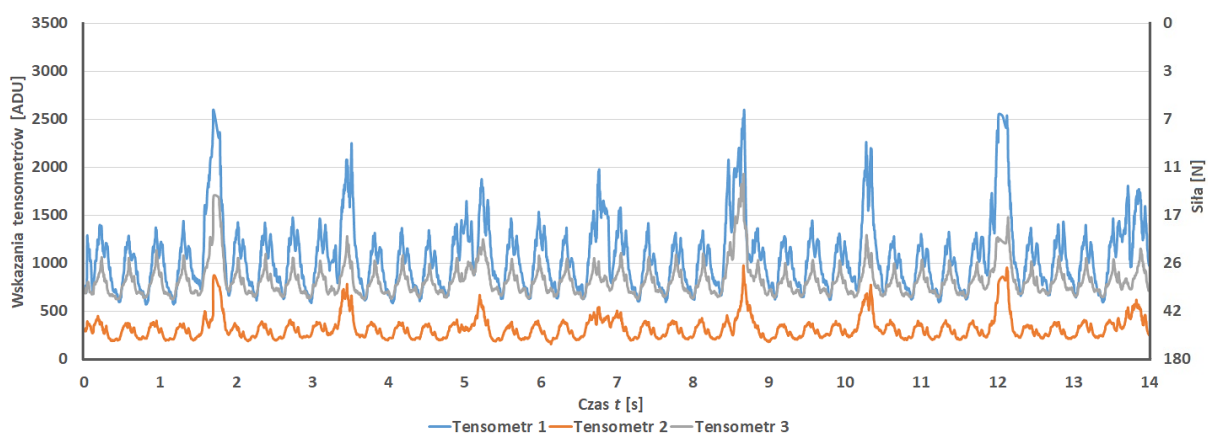
Rys. 5.26. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie II, $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



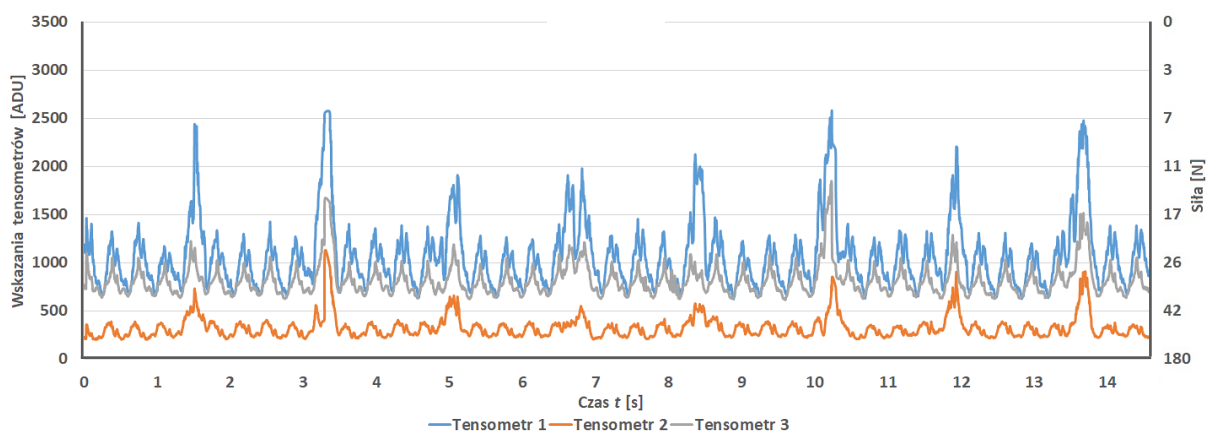
Rys. 5.27. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie III, $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



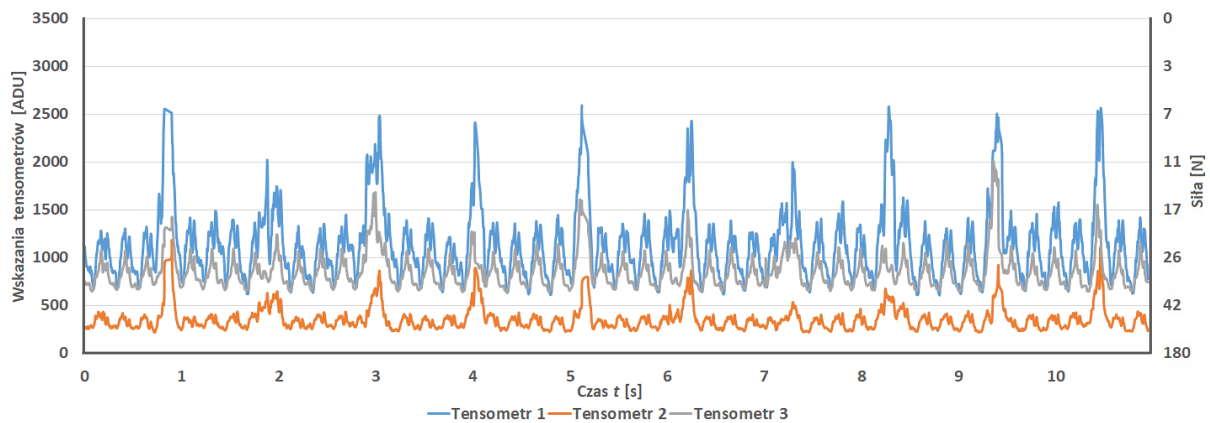
Rys. 5.28. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie I, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



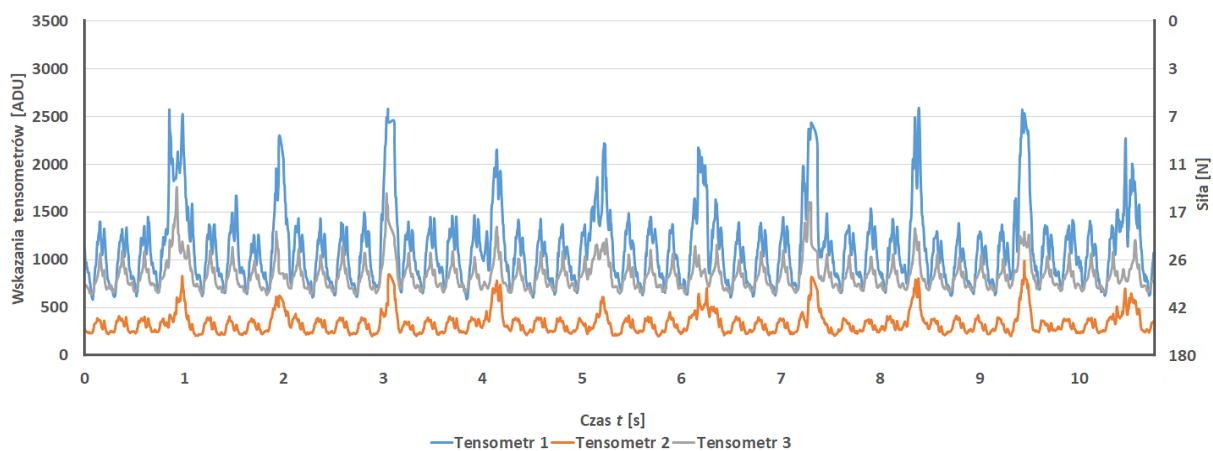
Rys. 5.29. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie II, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



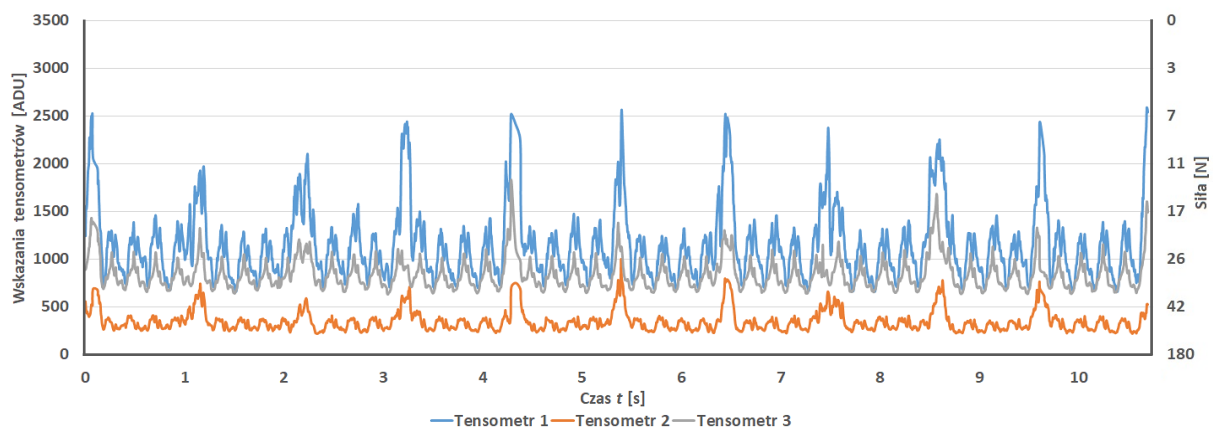
Rys. 5.30. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie III, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.31. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie I, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.32. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie II, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.33. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t0,5} = 0,5$ kg w strefie III, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Zwiększenie masy, którą obciążano taśmę do $m_{t1} = 1$ kg przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min, spowodował wzrost wartości siły nacisku taśmy F_n na tensometry dają następujące odczyty, odpowiednio:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 575 ADU $\approx 38,49$ N (rys. 5.34),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 158 ADU $\approx 105,67$ N (rys. 5.35),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 585 ADU $\approx 38,11$ N (rys. 5.36).

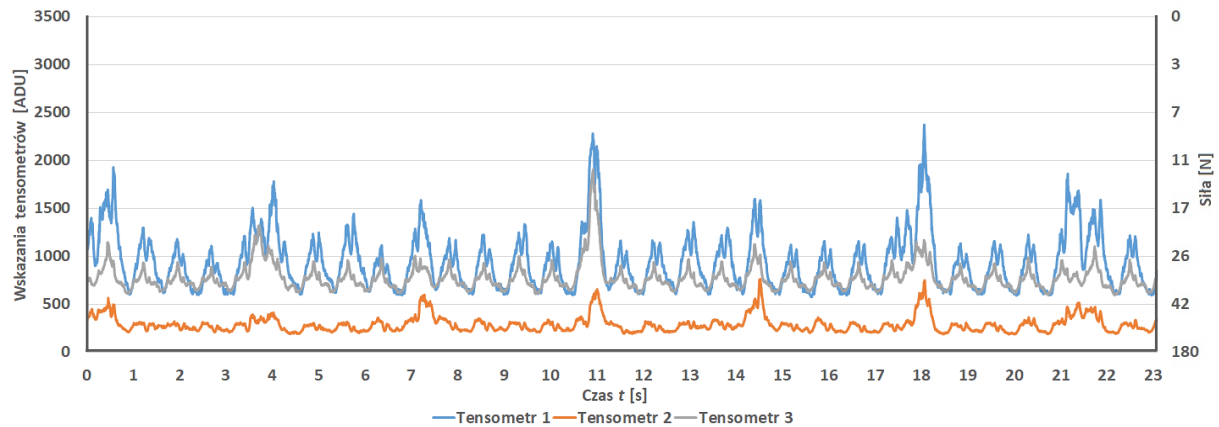
Dwukrotne zwiększenie prędkości do $n_2 = 318$ obr/min spowodowało wzrost wartości wskazań dla wszystkich badanych tensometrów. Zarejestrowane odczyt wyniosły:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 588 ADU $\approx 37,96$ N (rys. 5.37),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 185 ADU $\approx 101,26$ N (rys. 5.38),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 603 ADU $\approx 37,39$ N (rys. 5.39).

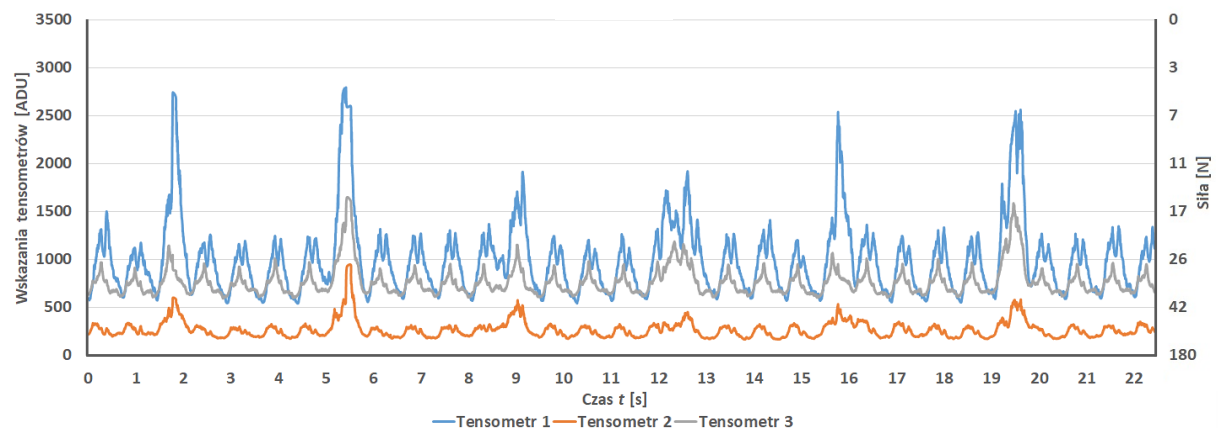
Wyniki otrzymane podczas badania układu dla prędkości $n_3 = 540$ obr/min powodują dalszy wzrost wskazań, który przedstawiał się następująco:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 611 ADU $\approx 37,08$ N (rys. 5.40),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 201 ADU $\approx 98,53$ N (rys. 5.41),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 621 ADU $\approx 36,70$ N (rys. 5.42).

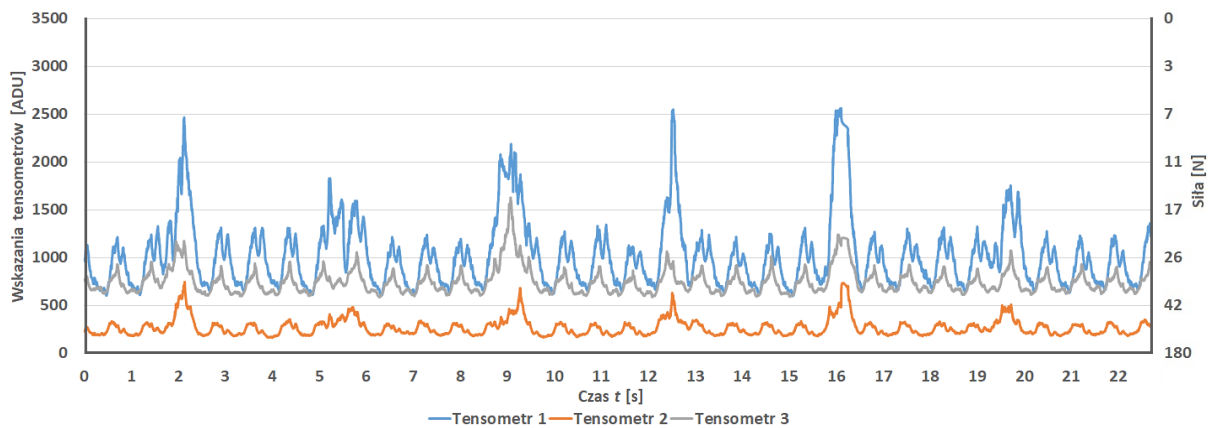
Podczas obciążania układu zaobserwowano podobne zjawisko, jak przy masie $m_{t0,5} = 0,5$ kg. Mianowicie, następowała zmiana wskazań, polegająca na wzroście wartości siły nacisków taśmy F_n na skrajne tensometry w chwili, gdy obciążenie było przykładane w jednej ze skrajnych stref przeciwnych do rozpatrywanego tensometru oraz spadek wartości siły nacisku F_n w porównaniu do obciążania strefy środkowej, co umożliwiła identyfikację położenia obciążenia w danie strefie.



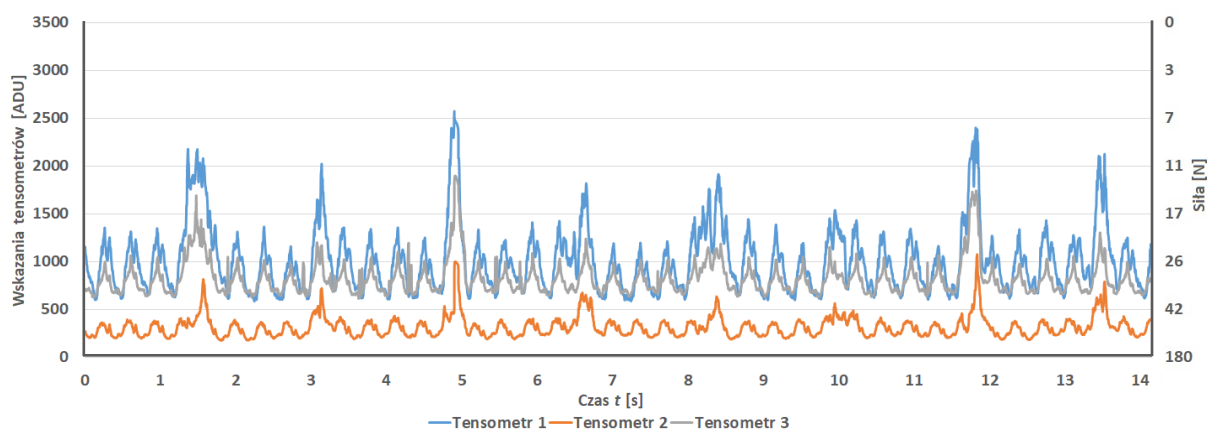
Rys. 5.34. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie I, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



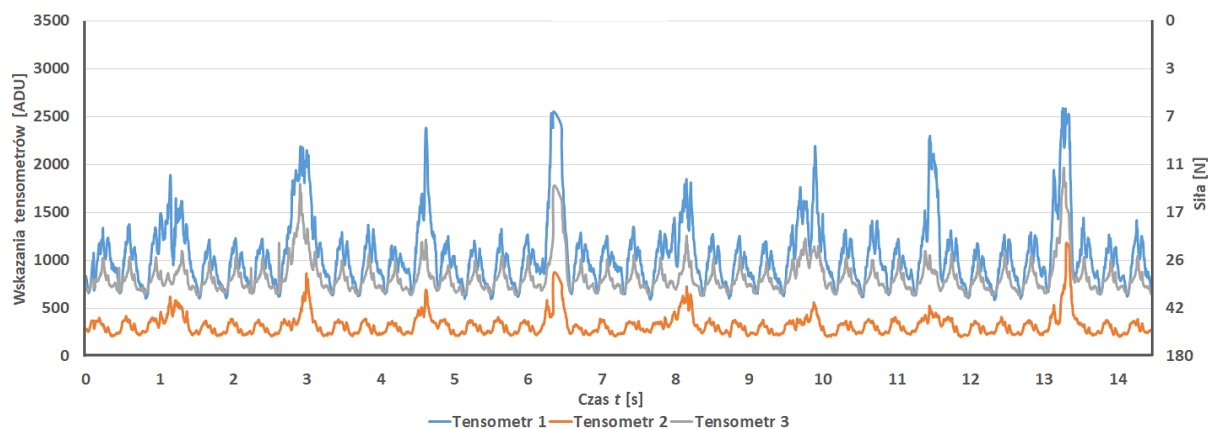
Rys. 5.35. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie II, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



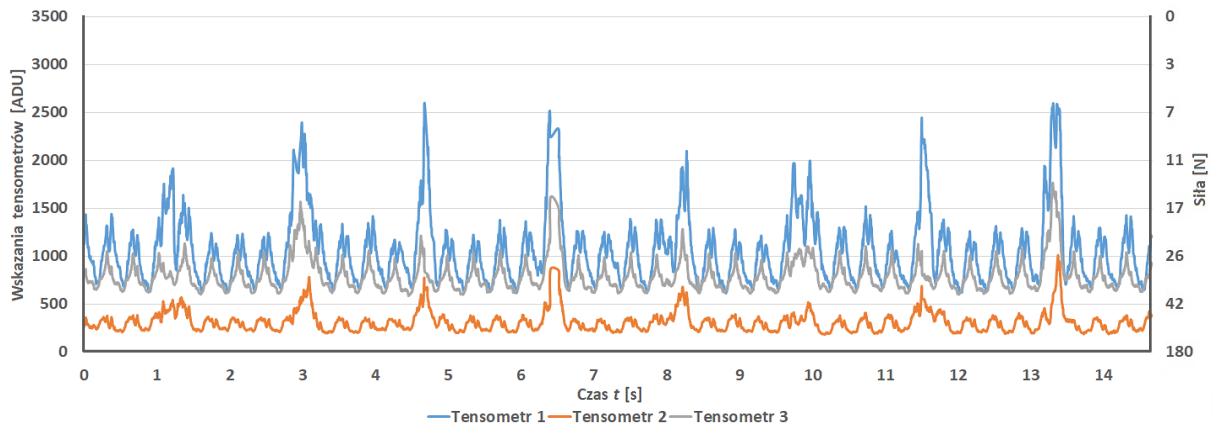
Rys. 5.36. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie III, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



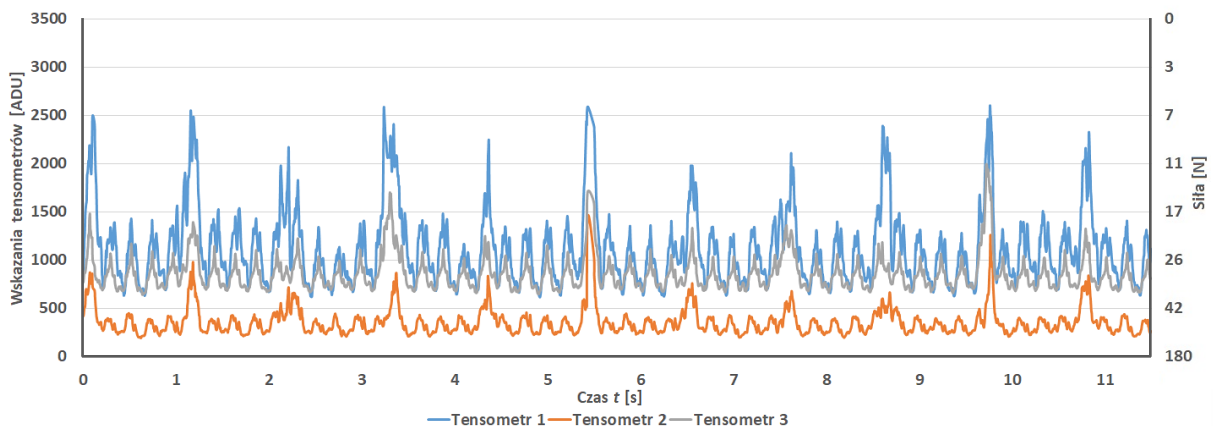
Rys. 5.37. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie I, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



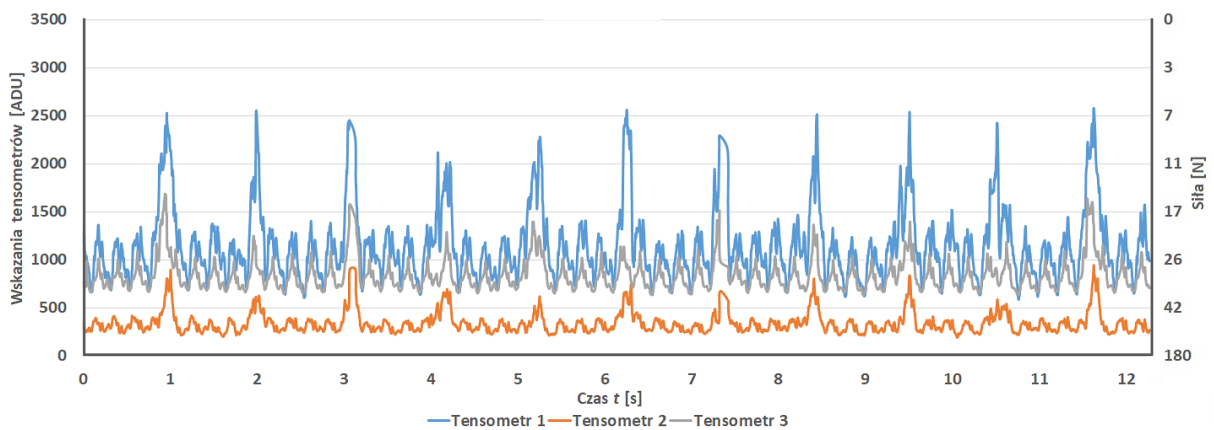
Rys. 5.38. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie II, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



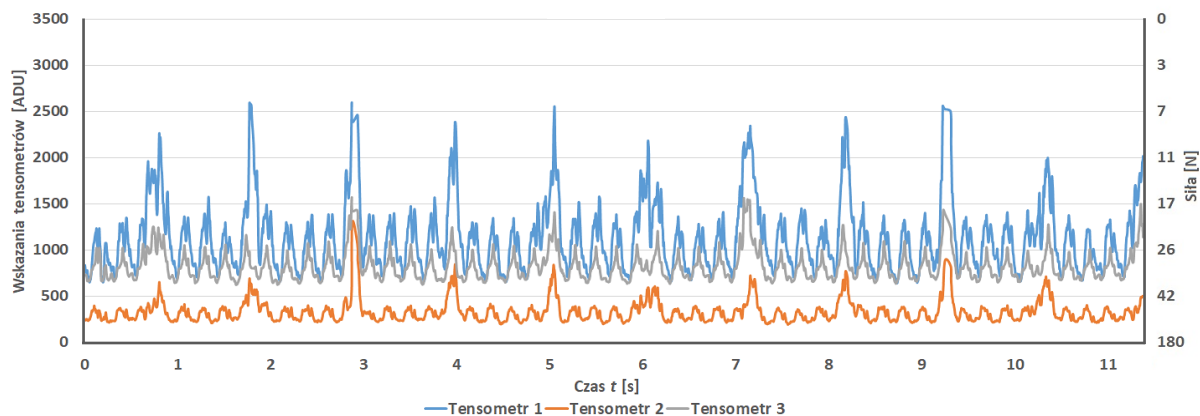
Rys. 5.39. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie III, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.40. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie I, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.41. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie II, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.42. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t1} = 1$ kg w strefie III, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Wzrost masy, którą obciążano taśmę, do $m_{t2} = 2$ kg przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min spowodował wzrost wartości siły nacisku taśmy F_n na tensometry dając następujące odczyty:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 551 ADU $\approx 39,57$ N (rys. 5.43),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 144 ADU $\approx 107,92$ N (rys. 5.44),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 545 ADU $\approx 39,80$ N (rys. 5.45).

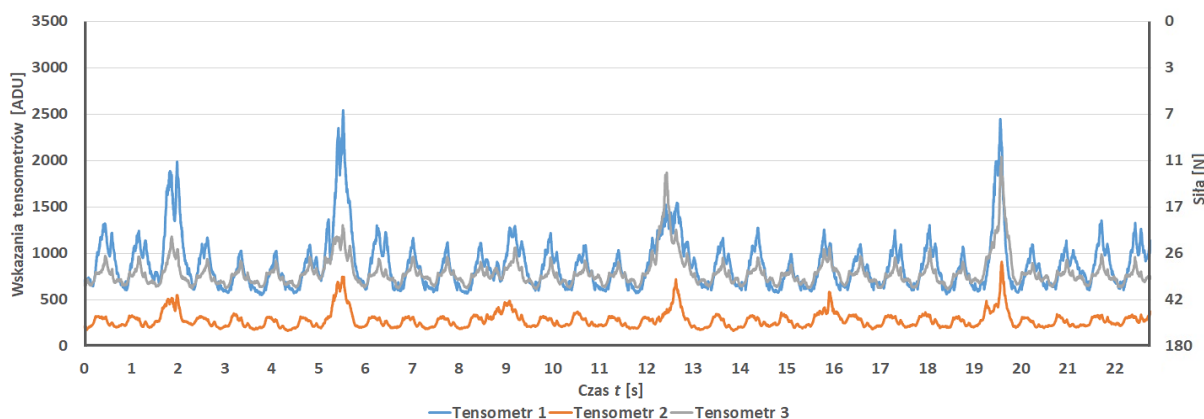
Dwukrotne zwiększenie prędkości do $n_2 = 318$ obr/min spowodowało wzrost wartości dla wszystkich badanych tensometrów. Zarejestrowane odczyty wyniosły:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 567 ADU $\approx 38,83$ N (rys. 5.46),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 158 ADU $\approx 105,67$ N (rys. 5.47),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 576 ADU $\approx 38,48$ N (rys. 5.48).

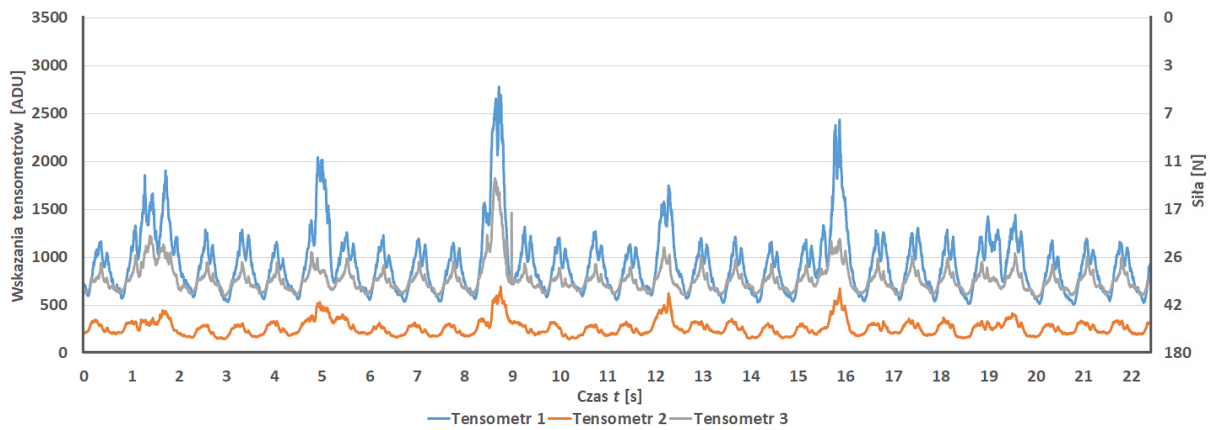
Zwiększenie prędkości ruchu do $n_3 = 540$ obr/min powodowało dalszy wzrost wskazań, który przedstawiał się następująco:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 595 ADU $\approx 37,71$ N (rys. 5.49),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 161 ADU $\approx 105,21$ N (rys. 5.50),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 592 ADU $\approx 37,79$ N (rys. 5.51).

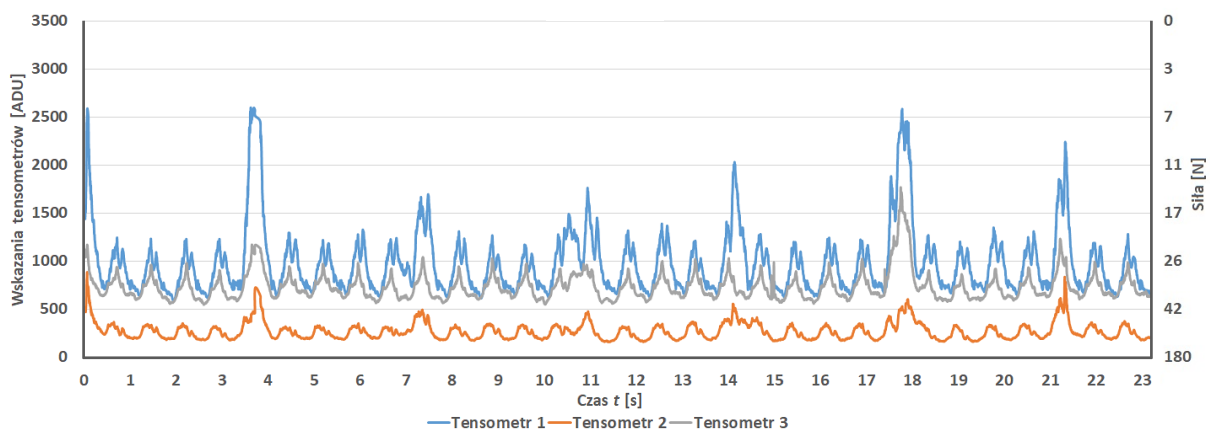
Ponownie zaobserwowano podobne zjawisko, jak przy masie $m_{t0,5} = 0,5$ kg oraz $m_{t1} = 1$ kg, tj. wzrost wartości wskazań skrajnych tensometrów w chwili, gdy obciążenie było przykładane w skrajnej strefie przeciwległej do rozpatrywanego tensometru w porównaniu do strefy środkowej.



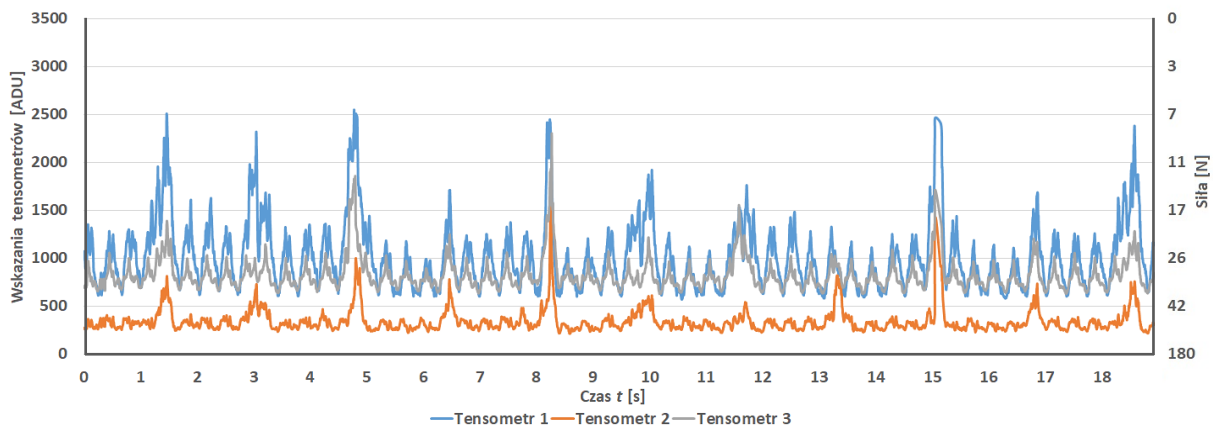
Rys. 5.43. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t2} = 2$ kg w strefie I, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



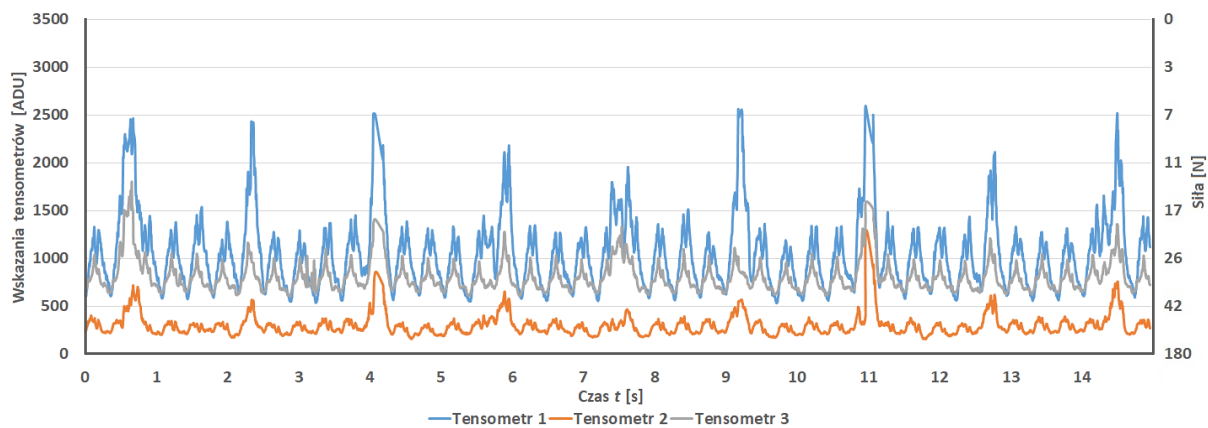
Rys. 5.44. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{l2} = 2$ kg w strefie II, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



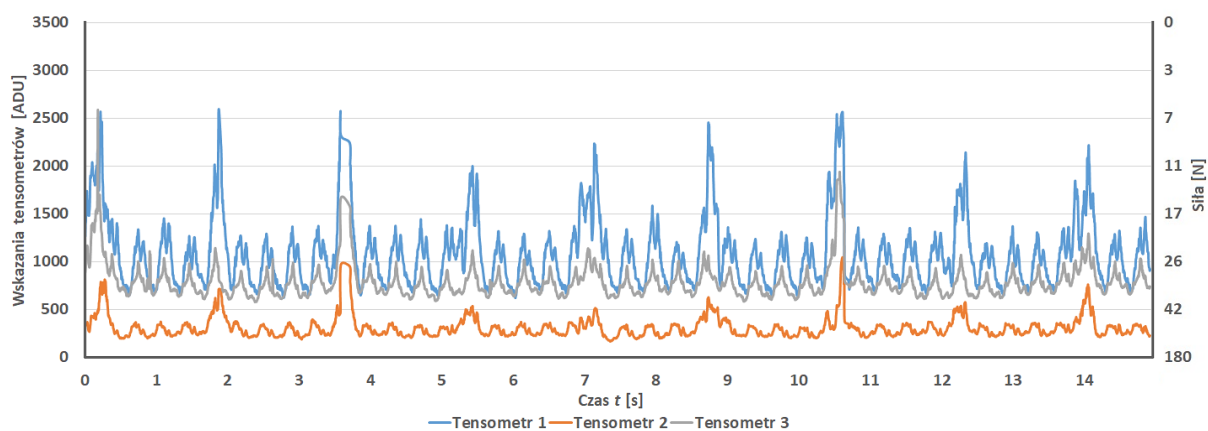
Rys. 5.45. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{l2} = 2$ kg w strefie III, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



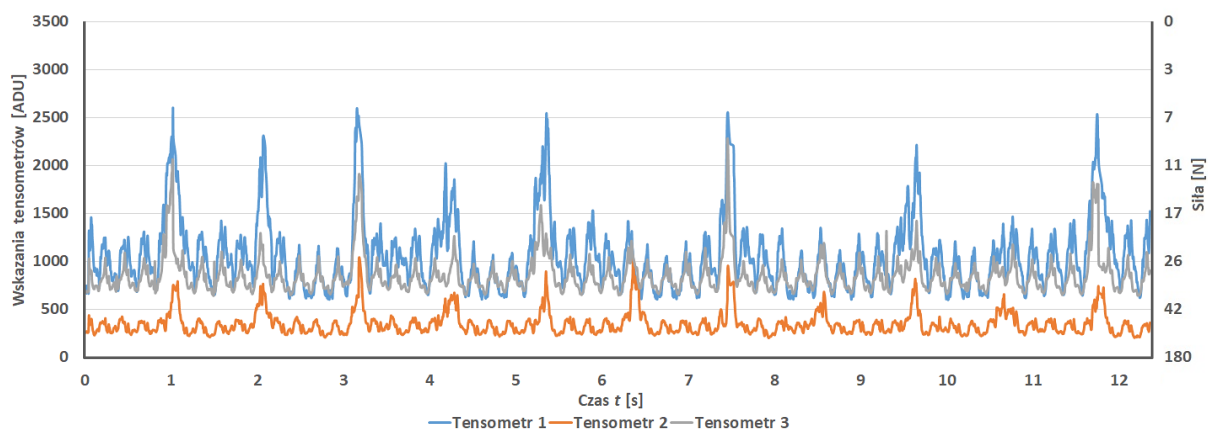
Rys. 5.46. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{l2} = 2$ kg w strefie I, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



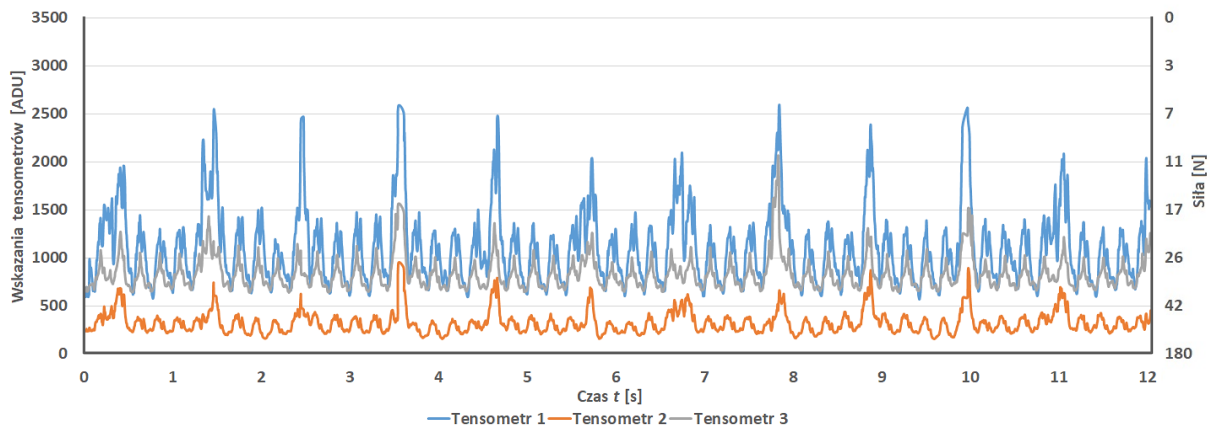
Rys. 5.47. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t2} = 2$ kg w strefie II, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



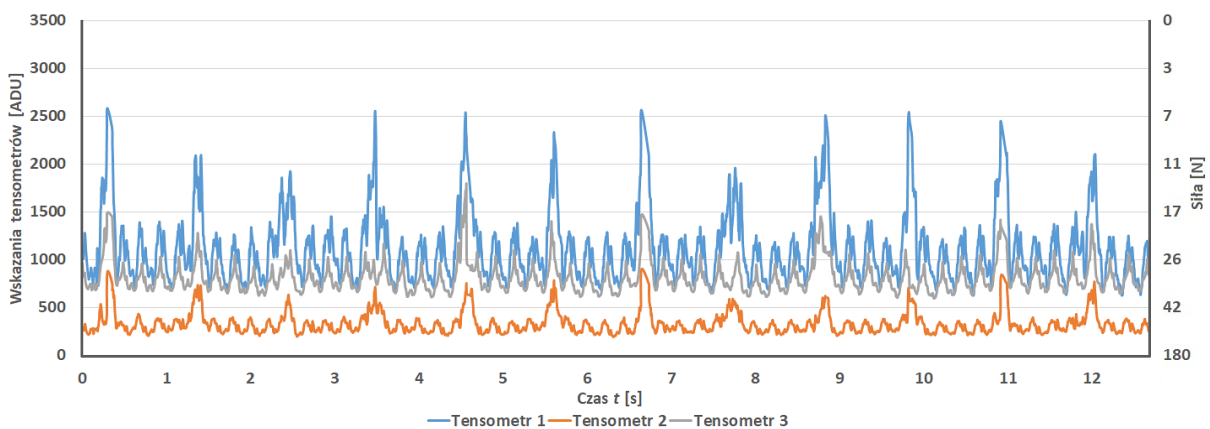
Rys. 5.48. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t2} = 2$ kg w strefie III, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.49. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t2} = 2$ kg w strefie I, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.50. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{12} = 2$ kg w strefie II, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.51. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{12} = 2$ kg w strefie III, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Podczas obciążenia taśmy masą $m_{13} = 3$ kg przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min, zarejestrowano następujące wskazania tensometrów:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 515 ADU $\approx 41,22$ N (rys. 5.52),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 118 ADU $\approx 112,21$ N (rys. 5.53),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 527 ADU $\approx 40,67$ N (rys. 5.54).

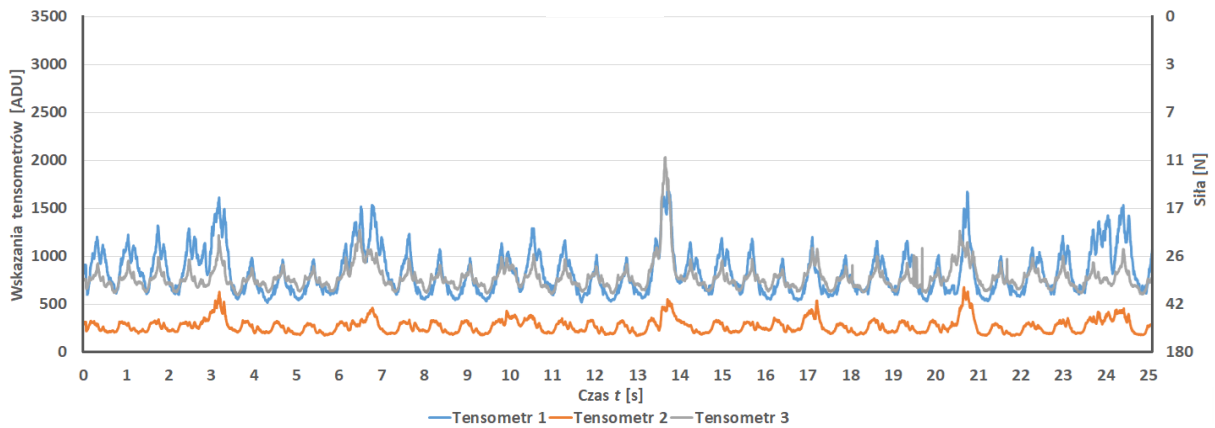
Dwukrotne zwiększenie prędkości do $n_2 = 318$ obr/min spowodowało wzrost wartości wskazań wszystkich badanych tensometrów w jednostkach ADU, co odpowiadało zmniejszeniu nacisków taśmy F_n na bęben. Zarejestrowane odczyty wyniosły:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 557 ADU $\approx 39,30$ N (rys. 5.55),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 137 ADU $\approx 109,06$ N (rys. 5.56),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 528 ADU $\approx 40,59$ N (rys. 5.57).

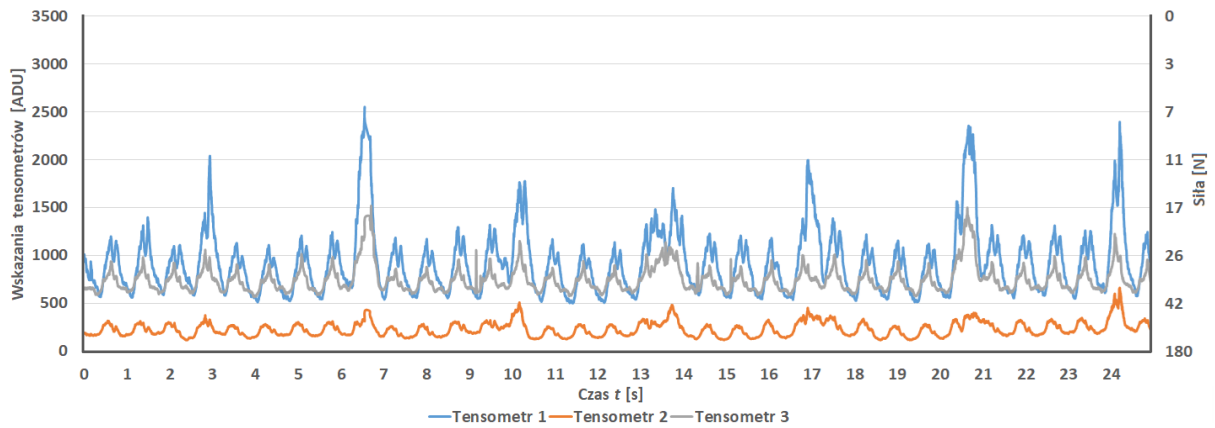
Przy zwiększeniu prędkości obrotowej bębna do $n_3 = 540$ obr/min zarejestrowano dalszy wzrost wskazań, który przedstawiał się następująco:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 560 ADU $\approx 39,14$ N (rys. 5.58),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 142 ADU $\approx 108,25$ N (rys. 5.59),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 561 ADU $\approx 39,13$ N (rys. 5.60).

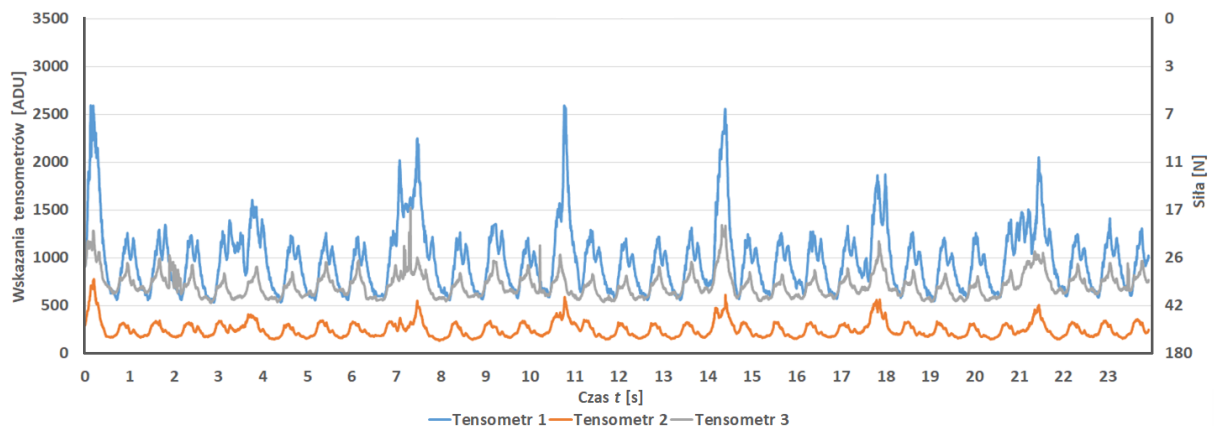
Ponownie zaobserwowano zjawisko, podobnie jak przy mniejszych obciążeniach. Tensometr, umieszczony w strefie przeciwległej do tej obciążonej, rejestrował zmniejszenie nacisku taśmy, co wyrażało się we wzroście wskazań w jednostkach ADU.



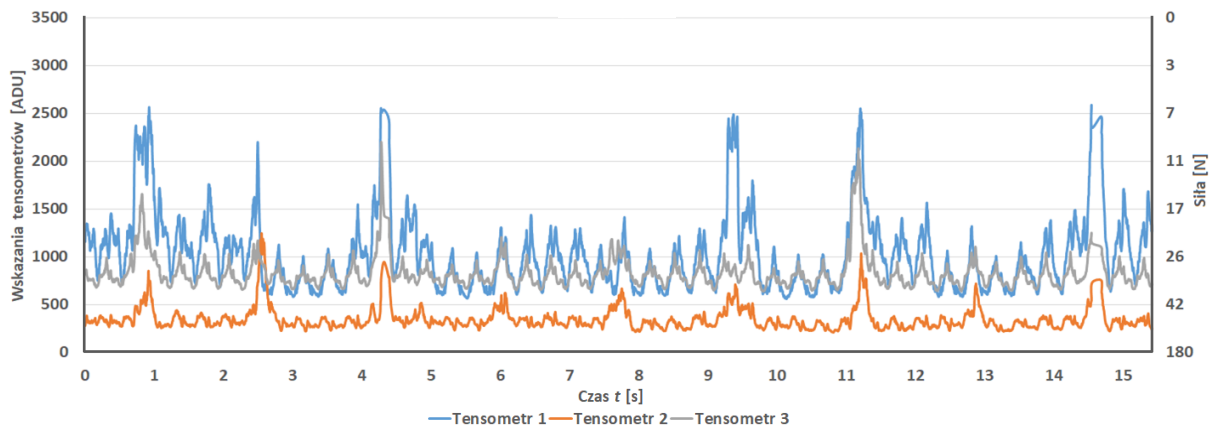
Rys. 5.52. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie I, $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



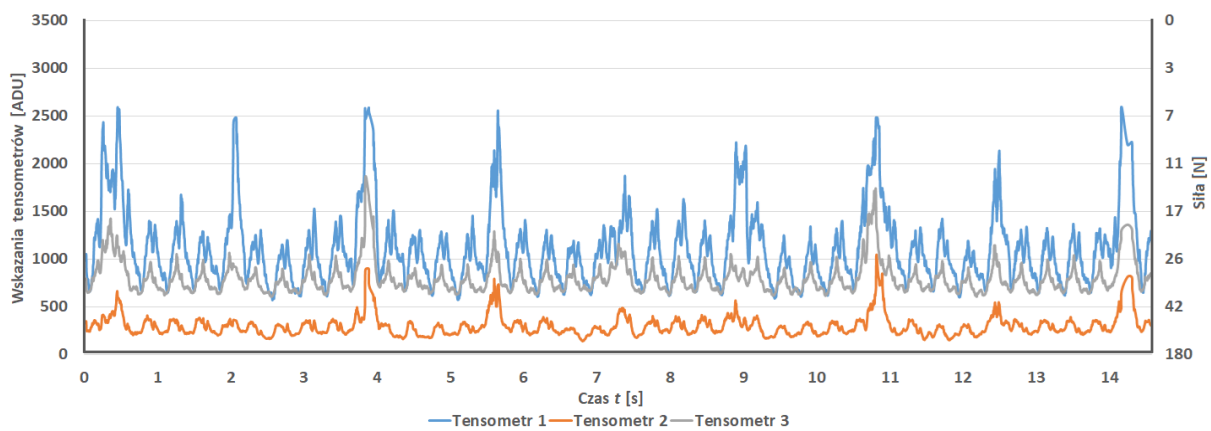
Rys. 5.53. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie II, $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



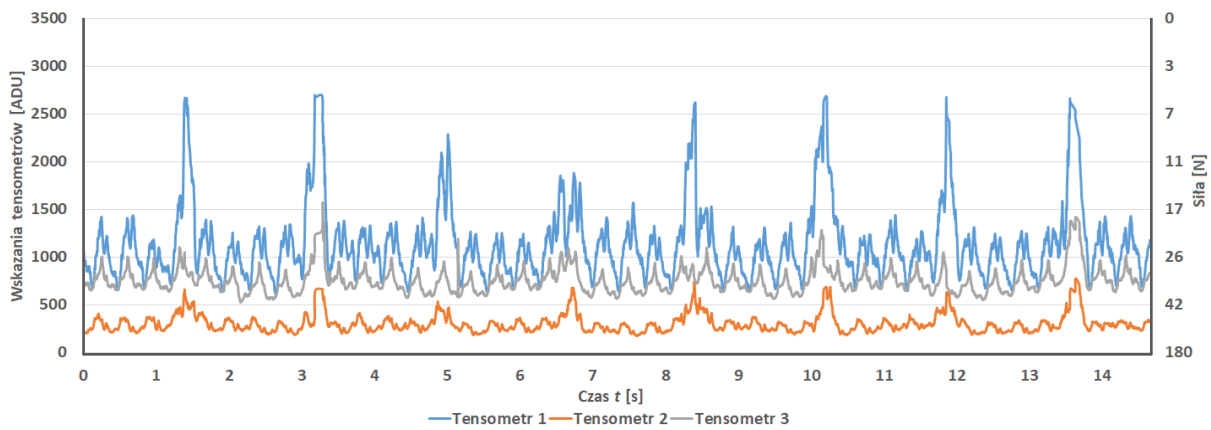
Rys. 5.54. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie III, $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



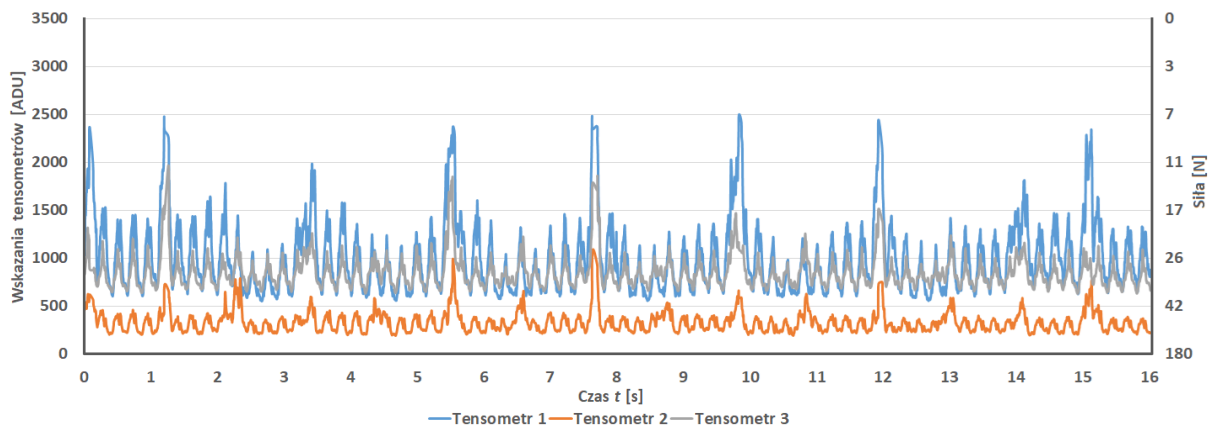
Rys. 5.55. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie I, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



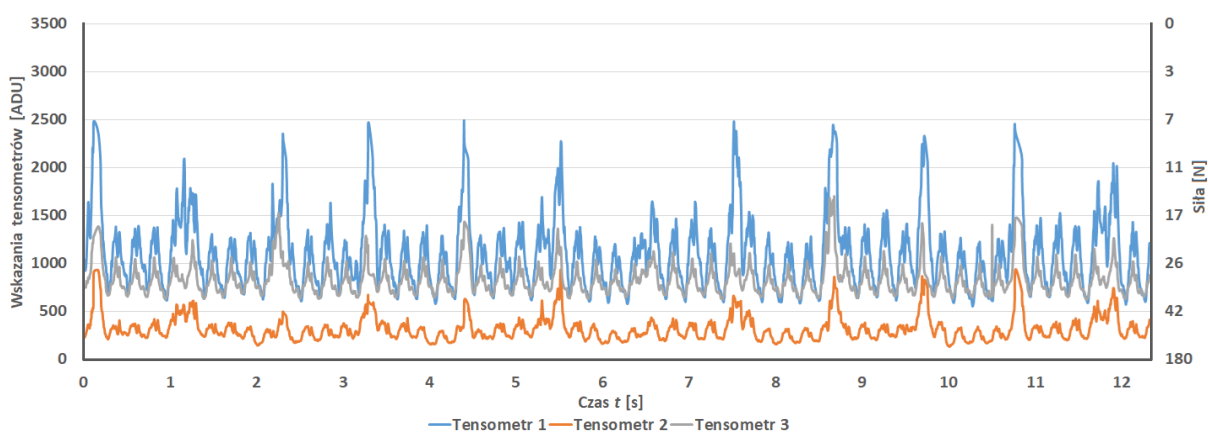
Rys. 5.56. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie II, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



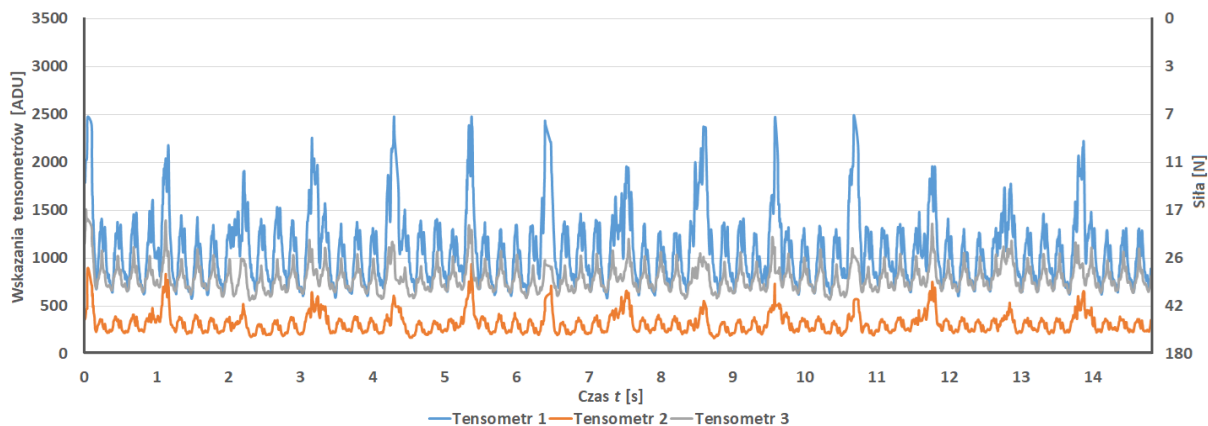
Rys. 5.57. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie III, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.58. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie I, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.59. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie II, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.60. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t3} = 3$ kg w strefie III, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Następnie przeprowadzono badanie przy użyciu największej masy $m_{t5} = 5$ kg, którą obciążano taśmę przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min. Zarejestrowano następujące odczyty, odpowiednio:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 403 ADU $\approx 48,06$ N (rys. 5.61),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 84 ADU $\approx 118,40$ N (rys. 5.62),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 476 ADU $\approx 43,31$ N (rys. 5.63).

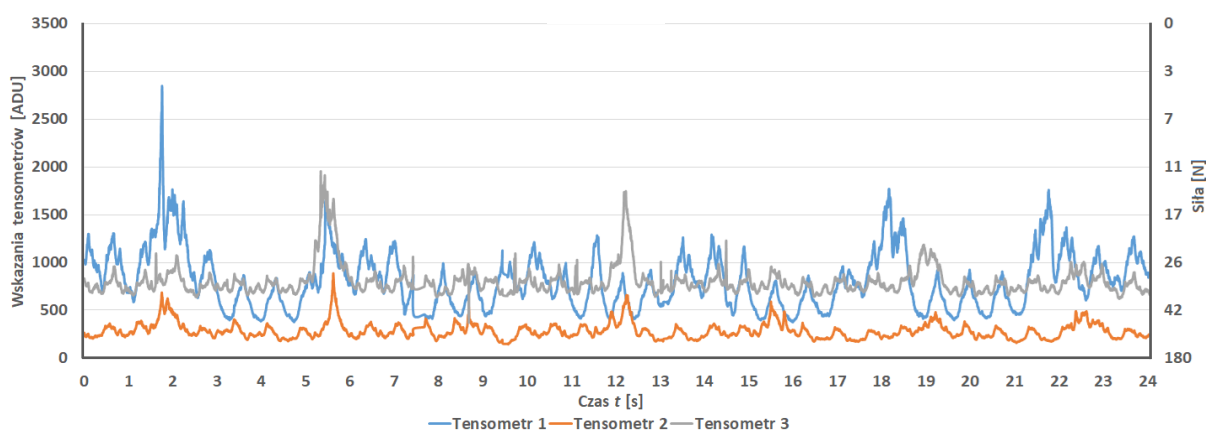
Zwiększenie prędkości do $n_2 = 318$ obr/min spowodowało wzrost wartości wskazań w jednostkach ADU dla wszystkich badanych tensometrów, a zarejestrowane najniższe odczyty wyniosły:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 457 ADU $\approx 44,37$ N (rys. 5.64),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 90 ADU $\approx 117,23$ N (rys. 5.65),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 3 480 ADU $\approx 43,08$ N (rys. 5.66).

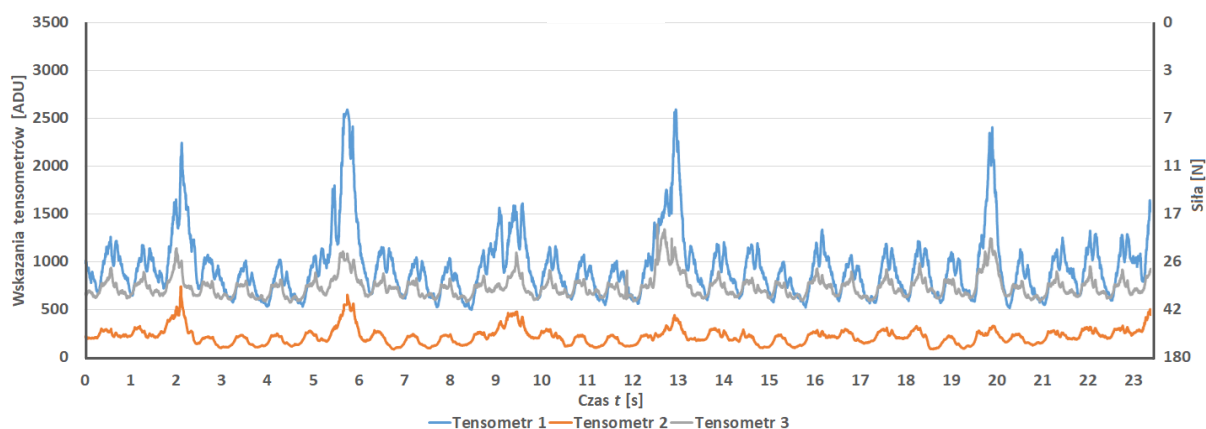
Dla największej prędkości $n_3 = 540$ obr/min odnotowano dalszy wzrost wskazań, który przedstawiał się następująco:

- obciążenie w strefie I, tensometr T1 wskazywał 467 ADU $\approx 43,78$ N (rys. 5.67),
- obciążenie w strefie II, tensometr T2 wskazywał 105 ADU $\approx 114,46$ N (rys. 5.68),
- obciążenie w strefie III, tensometr T3 wskazywał 484 ADU $\approx 42,86$ N (rys. 5.69).

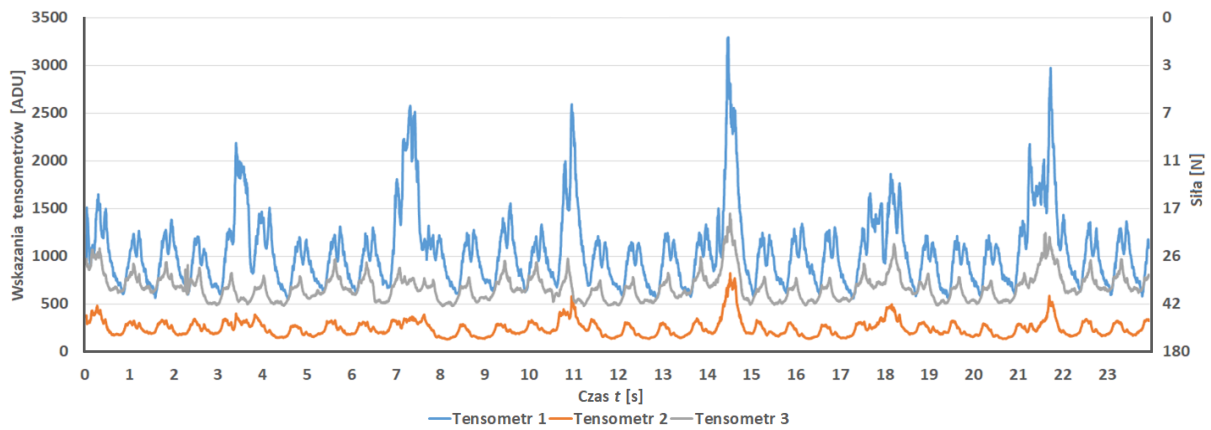
Podczas obciążania układu występuje opisane już wcześniej zaobserwowano zjawisko podobne jak przy mniejszych masach, którymi obciążano taśmę przenośnika. Oznacza to, że jako regułę należy przyjąć takie zachowanie taśmy przenośnika, przy którym zwiększenie obciążenia strefy I powodowało zwiększenie wartości siły nacisków F_n na przeciwległy tensometr T3 i odwrotnie, oraz spadek siły nacisków F_n w porywaniu do obciążania strefy środkowej, tym samym układ umożliwił identyfikację położenia wszystkich przyjętych w badanych wartości obciążenia.



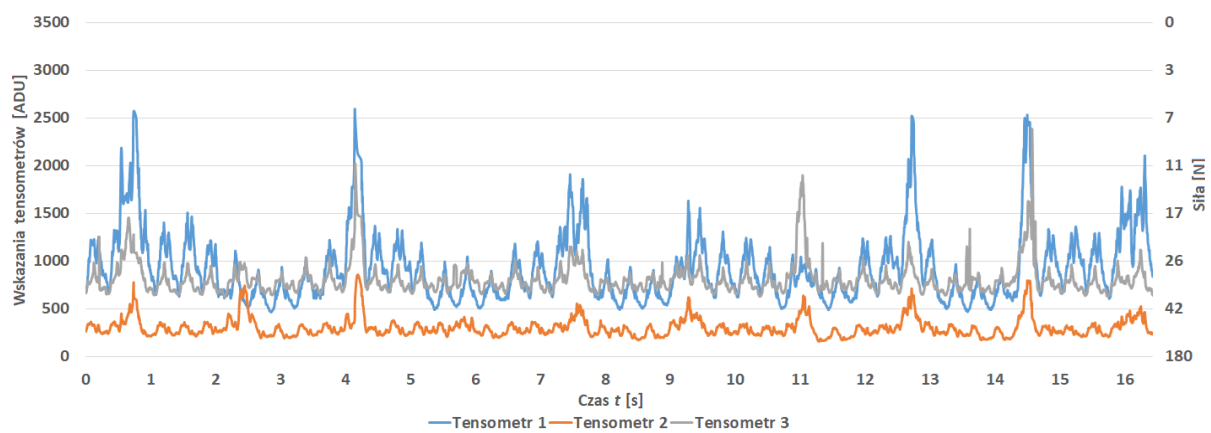
Rys. 5.61. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie I, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



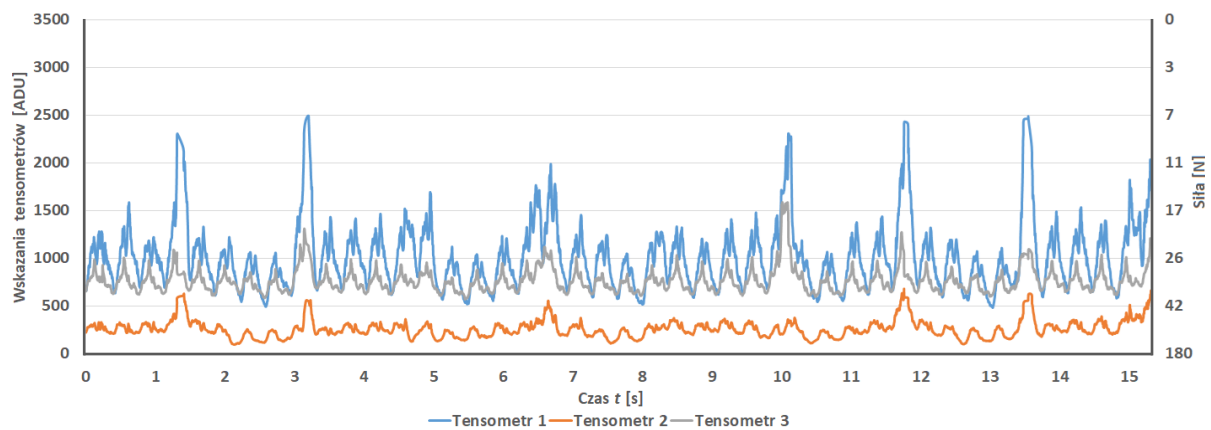
Rys. 5.62. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie II, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



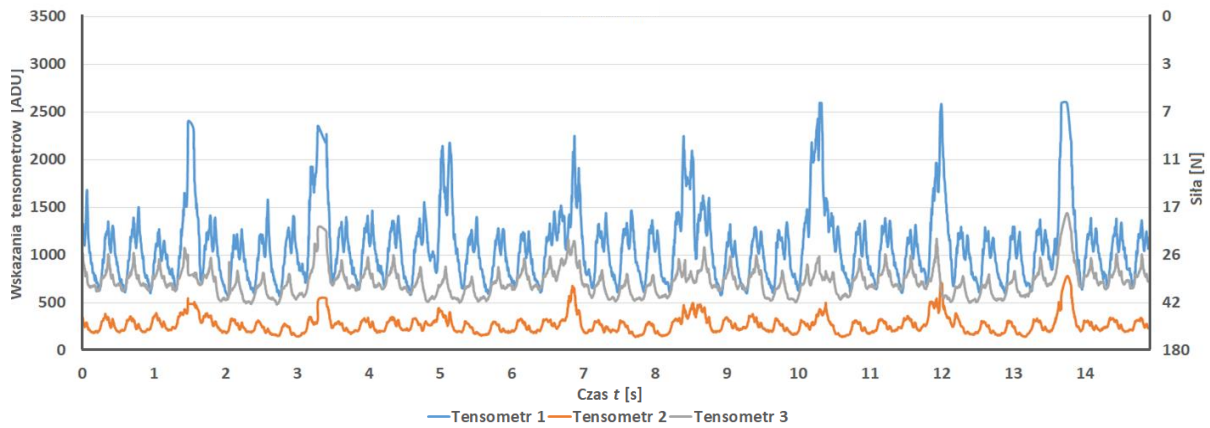
Rys. 5.63. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie III, $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



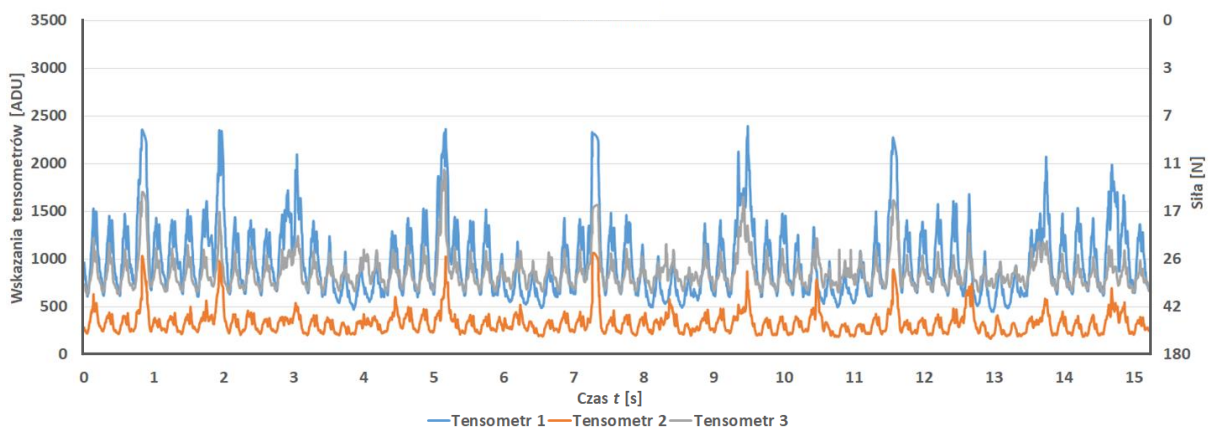
Rys. 5.64. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie I, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



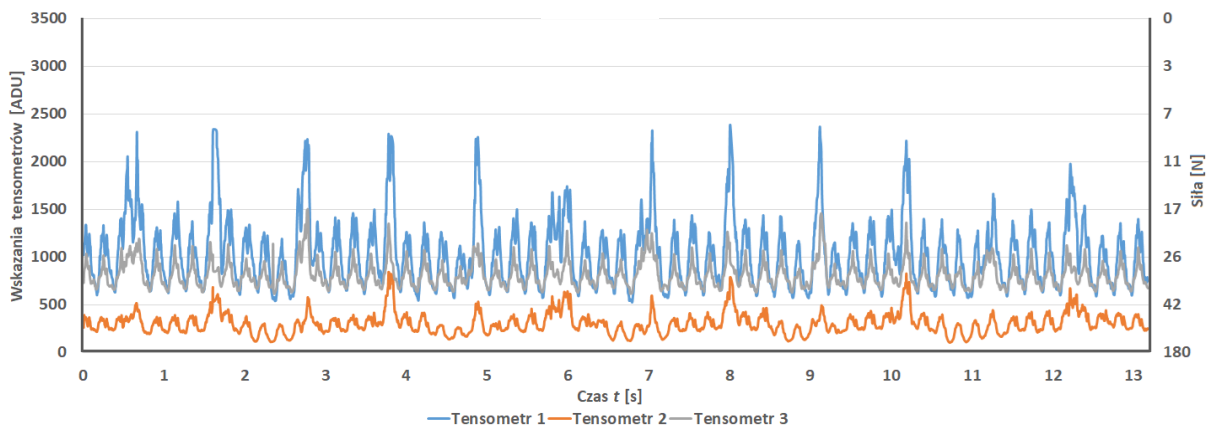
Rys. 5.65. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie II, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



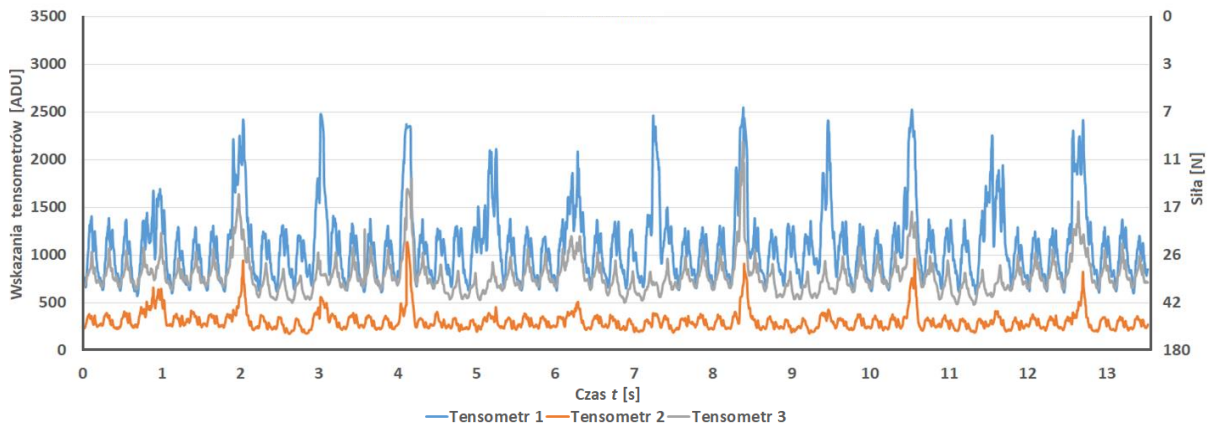
Rys. 5.66. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie III, $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.67. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie I, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.68. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{t5} = 5$ kg w strefie II, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)



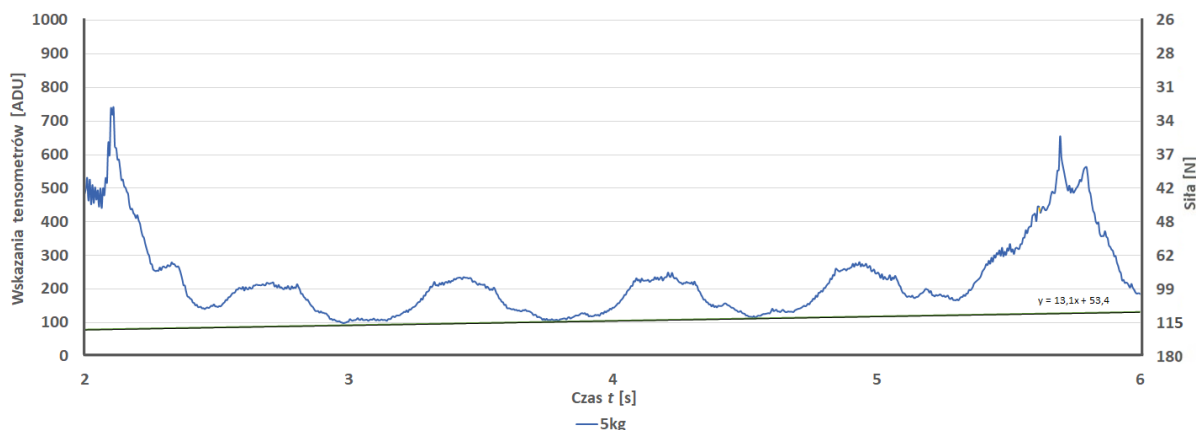
Rys. 5.69. Wskazania tensometrów przy obciążeniu taśmy masą $m_{15} = 5$ kg w strefie III, $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Charakter i cechy analizowanego sygnału

Z analizy wyników otrzymanych podczas pomiarów można zauważyć charakterystyczną cechę układu pomiarowego: zauważalny jest wzrost wartości wskazań tensometrów (odpowiadający zmniejszeniu nacisku taśmy F_n na tensometr) w miarę oddalania się obciążenia od bębna zwrotnego, na którym umieszczone były tensometry. Należy wnioskować, że wraz z oddalaniem się obciążenia od układu tensometrycznego w taśmie następuje relaksacja naprężeń, a rozkład nacisków na oba bębny staje się bardziej równomierny. Po tym, jak ciężar minie punkt środkowy długości taśmy i zacznie się zbliżać do bębna napędowego, większy nacisk F_n jest już wywierany przez taśmę na ten drugi bęben. Tensometry zaczynają wskazywać coraz większe wartości zmierzające w stronę tych zarejestrowanych podczas pracy przenośnika bez dodatkowego obciążania taśmy, ponieważ bęben napędowy przejmuje na siebie większość obciążenia. Efekt ten został zaobserwowany dla wszystkich pięciu wartości obciążenia oraz trzech stref rozmieszczenia odważników na taśmie, a także dla każdej z trzech prędkości pracy przenośnika, wykorzystanych w programie badawczym. Schematycznie ugięcie taśmy pod wpływem obciążenia, znajdującego się w pobliżu bębna zwrotnego, ukazuje rys. 5.70. Zwiększenie wartości wskazywanych przez tensometr T2 w miarę oddalania się odważnika m_{15} jest widoczne na rys. 5.69.



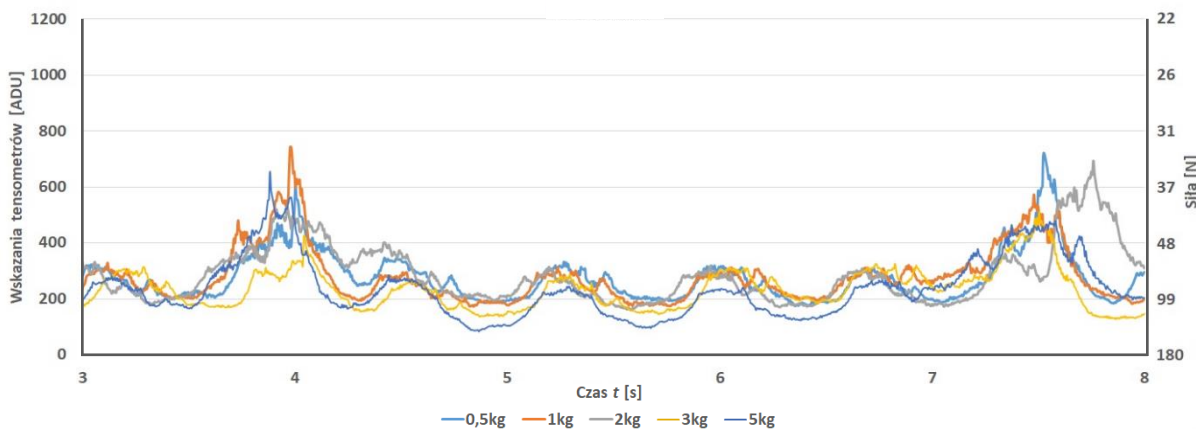
Rys. 5.70. Ugięcie taśmy pod obciążeniem (oprac. własne)



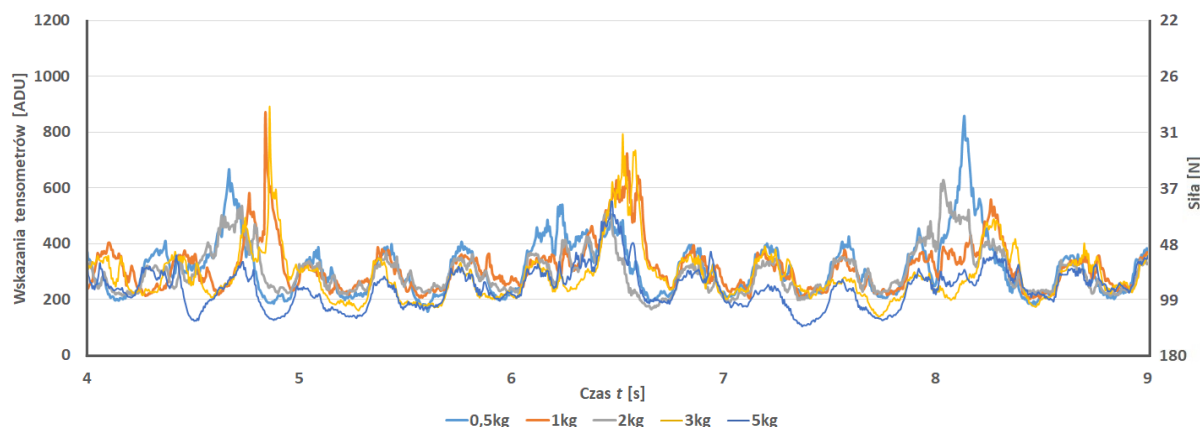
Rys. 5.71. Wykres zarejestrowanych wskazań dla tensometru T2 oraz masy $m_{15} = 5$ kg pomiędzy 2. a 6. Sekundą, prędkość $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)

Wartości obarczone błędem nadmiernym charakteryzują miejsce łączenia taśmy, dlatego nie były brane pod uwagę do dalszej analizy monitorowania obciążenia taśmy. Uwidaczniają się one na wykresach w postaci pojedynczych pików i mają związek z różnymi właściwościami mechanicznymi materiału taśmy, oraz ze zwiększoną lokalnie sztywnością.

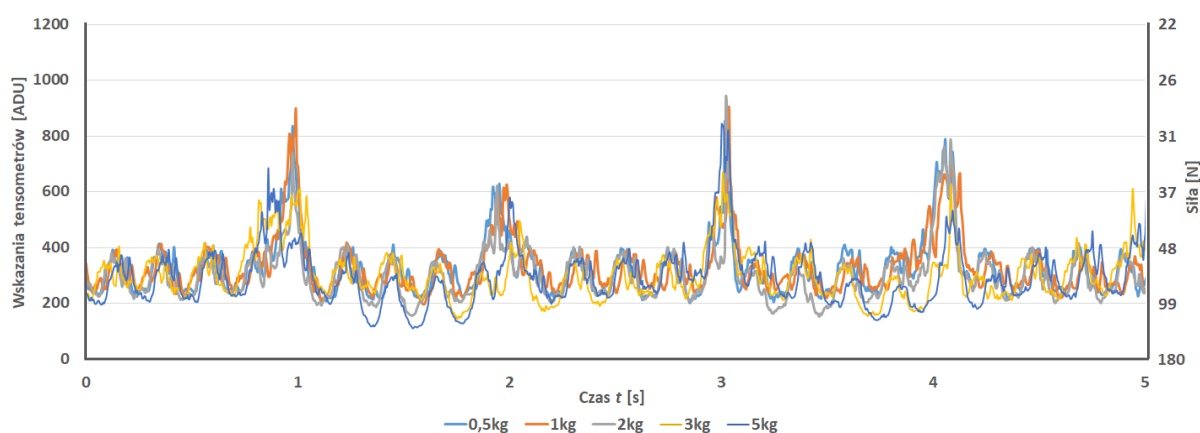
Na wykresie 5.71 został przedstawiony przebieg zarejestrowanych wskazań pomiędzy 2. oraz 6. sekundą w trakcie pomiaru przy obciążeniu taśmy masą $m_{15} = 5$ kg. Linia trendu opisana wzorem $y = 13,1x + 53,4$ przedstawia wzrost wartości ADU, tj. spadek siły nacisku F_n na środkowy tensometr wraz z oddalaniem się obciążenia od bębna, na którym były naklejone tensometry. Wykresy 5.72, 5.73, 5.74 przedstawiają wycinek z części nałożonych na siebie krzywych dla tensometru środkowego przy trzech prędkościach. Efekt spadku nacisku F_n wraz z oddalaniem się obciążenia od bębna z naklejonymi tensometrami jest zauważalny dla każdej prędkości oraz każdego z pięciu przykładowych obciążeń.



Rys. 5.72. Wskazania tensometru T2 przy obciążeniu taśmy, prędkość $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.73. Wskazania tensometru T2 przy obciążeniu taśmy, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.74. Wskazania tensometru T2 przy obciążeniu taśmy, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Wyniki zebrane w tabelach 5.11, 5.12, 5.13 przedstawiają charakterystyczne punkty pomiarowe P_c podczas obciążania taśmy poruszającej się z różnymi prędkościami. Dla każdego z trzech tensometrów zaobserwowano efekt wzrostu wartości siły podczas zwiększania masy obciążenia oraz spadek wartości siły wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej. Zjawisko to zostało zwizualizowane na wykresie na rys. 5.75.

Tab. 5.11. Wyniki dla punktów charakterystycznych P_c , tensometr T1

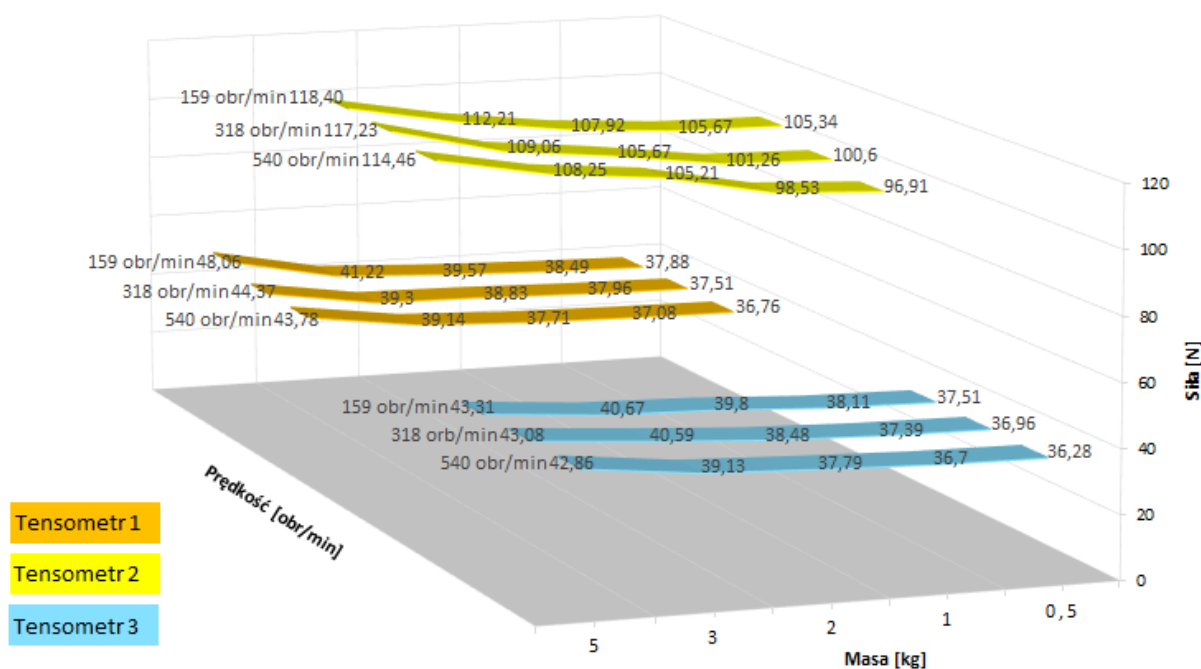
Masa / Prędkość	$m_{0,5} = 0,5$ kg	$m_{1l} = 1$ kg	$m_{l2} = 2$ kg	$m_{l3} = 3$ kg	$m_{l5} = 5$ kg
$n_1 = 159$ obr/min	590 ADU $\approx 37,88$ N	575 ADU $\approx 38,49$ N	551 ADU $\approx 39,57$ N	515 ADU $\approx 41,22$ N	403 ADU $\approx 48,06$ N
$n_2 = 318$ obr/min	600 ADU $\approx 37,51$ N	588 ADU $\approx 37,96$ N	567 ADU $\approx 38,83$ N	557 ADU $\approx 39,30$ N	457 ADU $\approx 44,37$ N
$n_3 = 540$ obr/min	619 ADU $\approx 36,76$ N	611 ADU $\approx 37,08$ N	595 ADU $\approx 37,71$ N	560 ADU $\approx 39,14$ N	467 ADU $\approx 43,78$ N

Tab. 5.12. Wyniki dla punktów charakterystycznych P_c , tensometr T2

Masa / Prędkość	$m_{0,5} = 0,5 \text{ kg}$	$m_{11} = 1 \text{ kg}$	$m_{12} = 2 \text{ kg}$	$m_{13} = 3 \text{ kg}$	$m_{15} = 5 \text{ kg}$
$n_1 = 159$ obr/min	160 ADU $\approx 105,34 \text{ N}$	158 ADU $\approx 105,67 \text{ N}$	144 ADU $\approx 107,92 \text{ N}$	118 ADU $\approx 112,21 \text{ N}$	84 ADU $\approx 118,40 \text{ N}$
$n_2 = 318$ obr/min	189 ADU $\approx 100,60 \text{ N}$	185 ADU $\approx 101,26 \text{ N}$	158 ADU $\approx 105,67 \text{ N}$	137 ADU $\approx 109,06 \text{ N}$	90 ADU $\approx 117,23 \text{ N}$
$n_3 = 540$ obr/min	210 ADU $\approx 96,91 \text{ N}$	201 ADU $\approx 98,53 \text{ N}$	161 ADU $\approx 105,21 \text{ N}$	142 ADU $\approx 108,25 \text{ N}$	105 ADU $\approx 114,46 \text{ N}$

Tab. 5.13. Wyniki dla punktów charakterystycznych P_c , tensometr T3

Masa / Prędkość	$m_{0,5} = 0,5 \text{ kg}$	$m_{11} = 1 \text{ kg}$	$m_{12} = 2 \text{ kg}$	$m_{13} = 3 \text{ kg}$	$m_{15} = 5 \text{ kg}$
$n_1 = 159$ obr/min	600 ADU $\approx 37,51 \text{ N}$	585 ADU $\approx 38,11 \text{ N}$	545 ADU $\approx 39,80 \text{ N}$	527 ADU $\approx 40,67 \text{ N}$	476 ADU $\approx 43,31 \text{ N}$
$n_2 = 318$ obr/min	614 ADU $\approx 36,96 \text{ N}$	603 ADU $\approx 37,39 \text{ N}$	576 ADU $\approx 38,48 \text{ N}$	528 ADU $\approx 40,59 \text{ N}$	480 ADU $\approx 43,08 \text{ N}$
$n_3 = 540$ obr/min	632 ADU $\approx 36,28 \text{ N}$	621 ADU $\approx 36,70 \text{ N}$	592 ADU $\approx 37,79 \text{ N}$	561 ADU $\approx 39,13 \text{ N}$	484 ADU $\approx 42,86 \text{ N}$



Rys. 5.75 Wartości siły nacisku taśmy F_n na tensometry dla obciążenia różnymi masami przy różnych wartościach prędkości obrotowej (oprac. własne)

Podsumowując wyniki eksperymentów z różnymi rodzajami obciążeń można stwierdzić, że układ tensometrów pozwala na wykrywanie nacisku wywieranego na powierzchnię taśmy, a także daje możliwość określania, jaki jest ciężar transportowanego elementu. Pozwala też na określenie położenia, tj. daje informacje, w jakiej części szerokości taśmy (strefie) znajduje się transportowany

element oraz jak daleko znajduje się on od bębna zwrotnego, na którym umiejscowione są tensometry. W ten sposób udowodniono drugą tezę pomocniczą i wykazano, że tensometryczny układ pomiarowy pozwala na pozyskanie informacji o prawidłowej pracy przenośnika.

W ramach niniejszej rozprawy zdołano wykonać jedynie rozpoznawcze badania, oceniające potencjalne możliwości systemu. W dalszych badaniach przewiduje się przeprowadzenie doświadczeń i analiz dla dynamicznych obciążeń, zbliżonych do sytuacji rzeczywistych w przemyśle, m.in. dla gwałtownych zmian wywołanych spadaniem na taśmę kilku obciążników, a także dla różnych ilości materiałów sypkich. Innym kierunkiem badań będą eksperymenty przy różnych długościach taśmy w celu ustalenia możliwych ograniczeń w zastosowaniu tensometrycznego systemu monitorowania. Na danym etapie są podstawy do twierdzenia, że w znacznym zakresie obciążeń taśmy w warunkach, w jakich wykonano pomiary, otrzymany sygnał jest powtarzalny i rozpoznawalny. Analiza wyników udowadnia postawioną tezę, że badany system pozwala na pozyskanie informacji o prawidłowej pracy przenośnika.

5.2.3. Uszkodzenia taśmy

W literaturze przedmiotu można spotkać podział uszkodzeń taśmy przenośnika na cztery kategorie (Zhang i in., 2021):

- zużycie powierzchni taśmy, które powoduje zmniejszenie jej grubości aż do starcia warstwy powierzchniowej (roboczej) i ujawnienia warstw wewnętrznych,
- uszkodzenie powierzchni, np. rozwarstwianie się i łuszczenie warstwy wierzchniej,
- wyrwania materiału taśmy, np. w wyniku jej zsuwania się z wałków czy zderzenia z obcym ciałem o ostrych krawędziach,
- zerwanie taśmy, np. w wyniku przeciążenia i wcześniejszych uszkodzeń.

Uszkodzenia takie jak przecięcia wzdłużne lub przebicia są przyczyną dużej części zniszczeń taśm, które w konsekwencji zmuszają do jej demontażu (Hardygóra i in., 2011). Eksploatacja taśmy powoduje, że okładki ulegają ścieraniu powodujące powstawanie mikropęknięć, które wraz z czasem ulegają propagacji przekształcając się w niszczące rdzeń taśmy pęknięcie skali makro. Na skutek uderzenia materiału głównie na etapie załadunku pojawiają się pęknięcia podłużne oraz uszkodzenia krawędzi (Ilanković i in., 2023)

Pojawiające się w wyniku eksploatacji taśmy uszkodzenia w postaci wzdłużnych nacięć i pęknięć tworzą nieciągłości w poprzecznym przekroju taśmy, stają się koncentratorami naprężeń. W przypadku procesu zmęczenia materiałów i występowania pęknięć obciążenia eksploatacyjne będą miały charakter losowych procesów, o których decyduje przebieg zmiennych naprężeń i odkształceń w obszarze koncentracji (Szala i in., 2014). Karb jest określany jako strefa zmian przekrojów poprzecznych lub otaczającej element krzywizn powierzchni. Uszkodzenie, które powodują zjawisko działania karbu, a tym samym zmiana wymiarów oraz kształtów obciążonych części, prowadzi do zmiany rozkładu oraz spiętrzenia naprężeń, które mogą być znacznie większe od nominalnych. Lokalne zagęszczenie punktów przez które jest przekazywane obciążanie prowadzi do zakłócenia liniowego przebiegu oraz skupienia strumienia sił. Powierzchnia tj. dno karbu jest przede wszystkim źródłem pęknięć, natomiast geometrię karbu opisuje współczynnik kształtu α_k , i rośnie w miarę zmniejszania się promienia zaokrąglenia. Wzrost wartości naprężeń występuję na dnie karbu, gdzie osiąga swoje maksimum i w przypadku elementów płaskich będzie występował jednoosiowy stan naprężeń, a elementów przestrzennych dwuosiowy. Występowanie karbów podczas eksploatacji powoduje ponad trzydzieści procent wszystkich zniszczeń zmęczeniowych elementów (Kocańda i Szala, 1997).

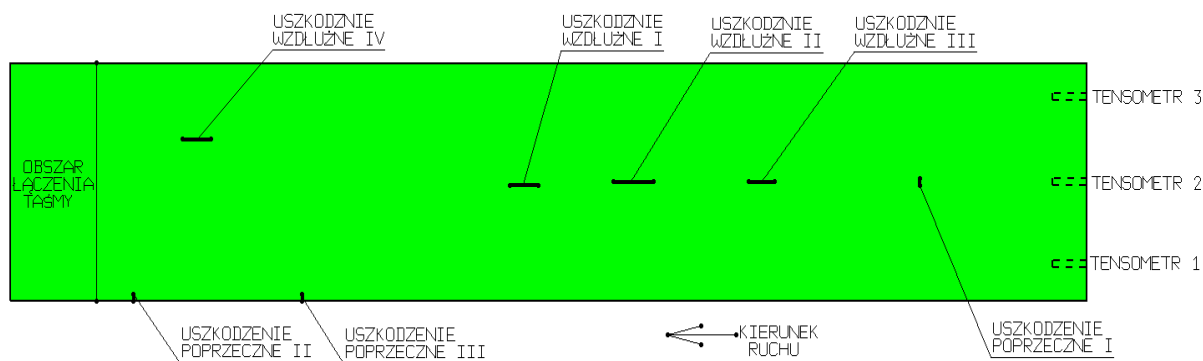
W związku z przeprowadzoną analizą literatury odniesie rodzajów uszkodzeń taśm oraz powodów jej napraw lub wymian została podjęta decyzja odnośnie do typu i kształtu uszkodzeń. Zostały wykonane nacięcia i całkowite przecięć wzdłużne oraz poprzeczne jako karby, których występnie będzie powodowało propagacje pęknięcia ze względu na wzrost naprężeń oraz zniszczenie taśmy. W modelu badawczym na taśmie przenośnikowej zostało wykonane siedem różnych uszkodzeń dla każdej z dwóch taśm. Wykonane zostały 4 uszkodzenia wzdłużne tj. zgodne z kierunkiem ruchu taśmy podczas pracy przenośnika: dwa przecięcia na wskroś oznaczone jako uszkodzenie wzdłużne I o długości 50 mm oraz uszkodzenie wzdłużne II o długości 70 mm. Kolejne dwa uszkodzenia wzdłużne są to niepełne przecięcia całej grubości taśmy, a jedynie powierzchniowe nacięcia na wybranej grubości, oznaczone jako uszkodzenie wzdłużne III mające 1 mm głębokości oraz 45 mm długości oraz uszkodzenie wzdłużne IV o głębokości 1,5 mm i długości 50 mm. Uszkodzenia poprzeczne oznaczone jako uszkodzenie poprzeczne: I, II oraz III, mają charakter całkowitych przecięć całej grubości taśmy na kierunku poprzecznym do kierunku ruchu taśmy podczas pracy przenośnika.

Charakter uszkodzeń, ich wielkość oraz głębokość były takie same dla każdej taśmy, natomiast różnicą było wzajemne rozmieszczenie na powierzchni lub grubości taśmy. Innymi słowy, zmieniona była kolejność oraz odległość uszkodzeń od siebie, co zostało przedstawione schematycznie dla każdej z taśm w dalszej części pracy. Dla każdej prędkości oraz etapu badań zostały wykonane co najmniej 10 pomiarów.

Na każdym z wykresów zaprezentowane zostały wskazania trzech tensometrów podczas wykrywania uszkodzeń (pokazanych na rys. 5.76) dla taśmy nr 1 oraz uszkodzeń (rys. 5.115) dla taśmy nr 2. W dolnej części wykresu, nad osią czasu, umieszczono oznaczenia uszkodzeń na taśmie, które w danym momencie znajdują się w bezpośrednim kontakcie z bębniem zwrotnym i przez to oddziałują na rozmieszczone na nim tensometry. Kształt i rozmieszczenie na taśmie uszkodzeń, oznaczonych UW I – UW IV oraz UP I – UP III, a także spoiny na taśmie oznaczonej jako ŁĄCZENIE, zostały pokazane na rys. 5.76 dla taśmy nr 1 oraz rys. 5.115 dla taśmy przenośnikowej nr 2. W tabelach 5.15 - 5.35 dla taśmy nr 1 oraz 5.37-5.45 dla taśmy nr 2 zostały przedstawione wyniki dla charakterystycznych punktów pomiarowych P_u , odpowiadające oddziaływaniu każdego uszkodzenia na tensometry. Są to największe wartości wskazań [ADU], reprezentujące spadek nacisku F_n lub najmniejsze wartości wskazań [ADU], reprezentujące wzrost nacisku F_n dla pojedynczego uszkodzenia znajdującego się w obszarze pomiarowym tensometrów, naklejonych na bębnie zwrotnym przenośnika. Wybrano takie właśnie punkty charakterystyczne ze względu na to, że w badanym systemie (rys. 4.28) opasanie bębniów oraz każdego z tensometrów wynosiło 180° , co powoduje oddziaływanie uszkodzenia na wskazania tensometru przez pewien czas, a nie jednorazowo. Zmiany wskazań w czasie oddziaływania zostały zarejestrowane z częstotliwością próbkowania 200 Hz osobno na każdym z trzech tensometrów: T1, T2, T3. Wartość pojedynczego wskazania, poza siłą nacisku F_n , jaką wywiera taśma z uszkodzeniami na część powierzchni tensometru, zależy również od innych czynników, szczegółowo opisanych w rozdziale 4.3: miejsca nacisku taśmy na tensometr paskowy opasający wałek (rys.5.5-5.10) oraz nieliniowej charakterystyki tensometru (rys 5.12).

Taśma nr 1

Uszkodzenia wykrywane przez tensometryczny układ pomiarowy dla badanej taśmy nr 1 zostały przedstawione na rys. 5.76. Schemat ten w pomniejszonej skali modelu rzeczywistego bezpośrednio odpowiada wymiarom całej rozwiniętej taśmy oraz długości i pozycji zadanych uszkodzeń.



Rys. 5.76. Schemat uszkodzeń taśmy przenośnikowej nr 1 (oprac. własne)

Tabela 5.14 przedstawia szczegółową charakterystykę oraz opis położenia uszkodzeń wykonanych w celach badawczych. Część z nich wykonano dla całej grubości taśmy (przecięcia), a część w postaci nacięć naruszała tylko część materiału badanej taśmy, bez całkowitego przecięcia.

Tab. 5.14. Opis uszkodzeń taśmy nr 1

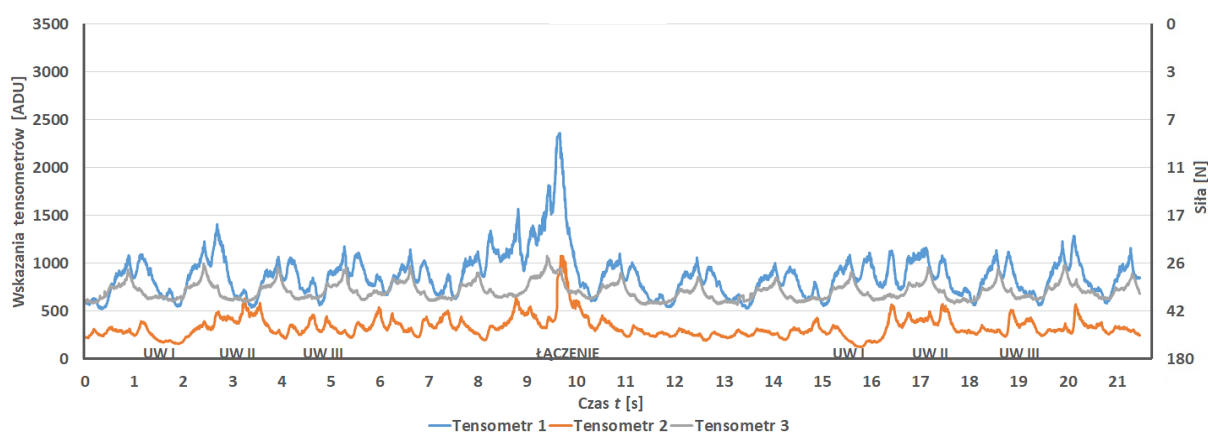
Rodzaj uszkodzenia	Oznaczenie	Opis
Uszkodzenie wzdłużne I	UW I	Przecięcie wzdłużne taśmy o długości 50 mm, 170 mm od brzegu (przesunięcie w kierunku tensometru T1 o 5 mm) 720 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie wzdłużne II	UW II	Przecięcie wzdłużne taśmy o długości 70 mm, 175 mm od brzegu (w osi tensometru T2) 900 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie wzdłużne III	UW III	Nacięcie wzdłużne o długości 45 mm i głębokości 1 mm, 175 mm od brzegu (w środkowej części taśmy) 1136 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie wzdłużne IV	UW IV	Nacięcie wzdłużne o długości 50 mm i głębokości 1,5 mm, 115 mm od brzegu (w połowie odległości tensometrów T2 i T3) 150 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie poprzeczne I	UP I	Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, 170 mm do 180 mm od brzegu (w osi tensometru T2) 1434 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie poprzeczne II	UP II	Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, 0 mm do 10 mm od brzegu (od strony tensometru TI) 65 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie poprzeczne III	UP III	Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, 0 mm do 10 mm od brzegu (od strony tensometru TI) 359 mm od obszaru łączenia
Obszar łączenia taśmy	ŁĄCZENIE	Obszar łączenia końców taśmy przenośnikowej identyfikowany przez układ pomiarowy nie będący jej uszkodzeniem

Dynamiczna identyfikacja uszkodzeń, wykonanych na taśmie numer jeden, przebiegała w trzech etapach dla 4 różnych prędkości obrotowych bębna napędowego: $n_0 = 80$ obr/min, $n_1 = 159$ obr/min, $n_2 = 318$ obr/min oraz $n_3 = 540$ obr/min dla pierwszego etapu. Na tym etapie wykonano uszkodzenia wzdłużne UW I, UW II i UW III oraz identyfikowano obszar łączenia taśmy, po czym zebrano 120 charakterystyk. W drugim etapie wykonano kolejne uszkodzenia, UW IV oraz UP I, natomiast pomiary wykonano dla trzech prędkości obrotowych: $n_1 = 159$ obr/min, $n_2 = 318$ obr/min oraz $n_3 = 540$ obr/min. W ten sposób zebrano 150 charakterystyk. Etap numer trzy to wykonanie kolejnych dwóch uszkodzeń oznaczonych jako UP II oraz UP III oraz wykonanie 5 pomiarów przy prędkości 159 obr/min, zebrano 35 charakterystyk. Łącznie otrzymano 305 charakterystyk, na których zostały zarejestrowane co najmniej dwa razy te same uszkodzenia, które były wykrywane przez tensometry w momencie, gdy taśma z danym typem uszkodzenia opasała bęben przenośnika, jak

pokazano na rys. 4.26. W ten sposób dany typ uszkodzenia znajdował się w zakresie identyfikacji tensometrów. Przedstawiono poniżej kilka przykładowych charakterystyk wskazań dla każdej z czterech prędkości oraz trzech etapów badań.

Etap 1, prędkość 80 obr/min

Zarejestrowane podczas badań wartości wskazań dla punktów charakterystycznych P_u , powiązanych z uszkodzeniami, przedstawiono w tabelach 5.15-5.35. Uszkodzenie UW I występuje w przedziale 1,5-2,2 s i jest zaznaczone na wykresie na rys. 5.77. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wtedy wynosiła 158 ADU, co wskazano w tabeli 5.15 w linijce „Przejście 1”. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie zostało wskazane w pobliżu 16. sekundy. Na wykresie T2 widoczne jest w tym miejscu powtórne charakterystyczne zakrzywienie, jak w pierwszym przejściu, a najmniejszą wartość wskazania umieszczono w drugiej linijce tabeli 5.12. wyniosła ona 126 ADU. Należy odnotować, że wskazania pozostałych tensometrów T1 i T3 wykazują mniejsze zmiany niż tensometr T2 w przebiegach sygnału w okolicy uszkodzenia UW I. Kolejne zarejestrowane w trakcie badania uszkodzenie oznaczone jako UW II jest identyfikowane pomiędzy 2,8-3,8 s w przypadku przejścia 1, tensometr T2 wskazał wtedy 497 ADU. Natomiast zewnętrzne czujniki wskazywały odpowiednio: tensometr T1 1409 ADU oraz tensometr T3 1000 ADU. W przypadku „przejścia 2” uszkodzenie zostało zarejestrowane pomiędzy 16,7-17,9 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 570 ADU, a także przez pozostałe tensometry – 1135 ADU dla tensometru T1 i 802 ADU jako największa wartość odczytu tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć charakterystyczny skok wartości dla tensometru T2 oraz zaburzenie przebiegu sygnału w przypadku zewnętrznych tensometrów T1 oraz T3. Widoczne na rysunku 5.75 uszkodzenie o oznaczeniu UW III pojawiają się dwukrotnie, zarówno w trakcie przejścia 1 w pobliżu zakresu pomiędzy 4,2-5,5 s, w którym tensometry wskazały największe wartości takie jak 633 ADU w przypadku tensometru T2, 1069 ADU dla tensometru T1 oraz 954 ADU dla tensometru T3. W trakcie przejścia 2 sygnał wskazujący na uszkodzenie występuje w pobliżu 19 sekundy, największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 574 ADU, dla tensometru T1 było to 1203 ADU oraz dla tensometru T3 960 ADU.



Rys. 5.77. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_0 = 80$ obr/min (oprac. własne)

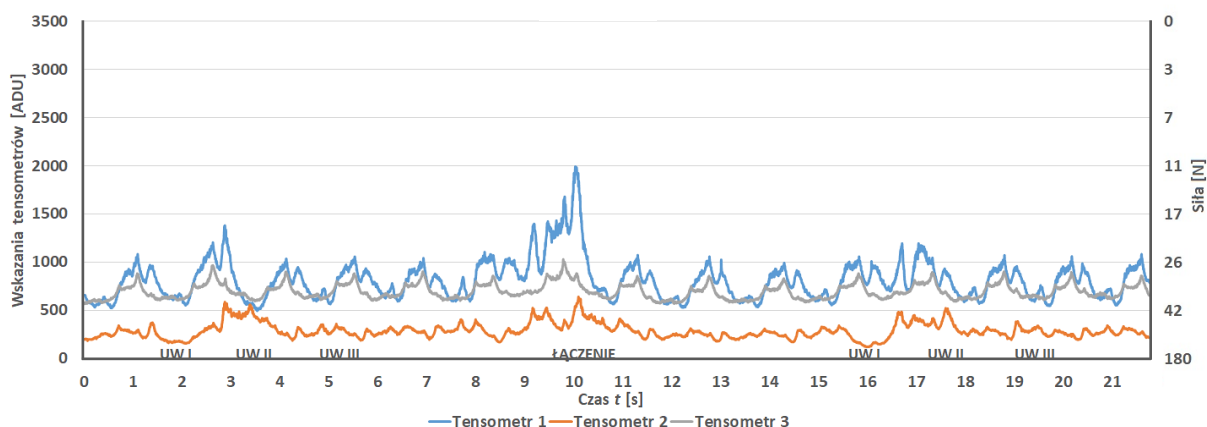
Tab. 5.15. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 5

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1094	158	936	1409	497	1000	1069	633	954
Przejście 2	1159	126	939	1135	570	802	1203	574	960

W przypadku pomiaru nr 17 największa wartość wskazania tensometru T2 wynosiła 590 ADU, co pokazano w tabeli 5.16 w linii „Przejście 1”. Na rysunku 5.78 jest to widoczne w zakresie pomiędzy 1,5-2,5 s. Największa wartość tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1086 ADU natomiast tensometru T3 885 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie wpłynęło na przebieg sygnału w przejściu 2 pomiędzy 15,5-16,3 s. Na wykresie wskazanie tensometru T2 przedstawia powtórne charakterystyczne zagłębienie, podobnie jak w pierwszym przejściu. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w przypadku przejścia 2 wyniosła 123 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1060 ADU. Tensometr T3, podobnie jak w przypadku przejścia 1, wskazał 885 ADU. Należy odnotować, że wskazania zewnętrznych tensometrów T1 i T3 wykazują mniejsze zmiany niż środkowy tensometr T2 w przebiegach sygnału w okolicy miejsca uszkodzenia UW I, podobnie jak dla pomiaru nr 5. Uszkodzenie oznaczone jako UW II jest identyfikowane pomiędzy 2,7-3,7 s w przypadku przejścia 1, tensometr T2 wskazał wtedy 590 ADU natomiast zewnętrzny tensometr T1 wskazał 1357 ADU, a tensometr T3 970 ADU. W przypadku „przejścia 2” uszkodzenie występuje pomiędzy 16,8 a 17,8 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 525 ADU oraz 1196 ADU dla tensometru T1 i 898 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć charakterystyczny skok wartości dla tensometru T2 jak również tensometrów T1 oraz T3. Zakłócenia w przebiegu wskazań, odpowiadające występowaniu nacięcia wzdłużnego o oznaczeniu UW III, pojawiają się w momencie przejścia 1 w okolicach 4,6-5,9 s. Tensometry wskazały wówczas największe wartości odpowiednio 423 ADU w przypadku tensometru T2 i 1038 ADU dla tensometru T1 oraz 903 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie UW III w przejściu nr 2 odpowiada 18,8-19,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 389 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1075 ADU oraz dla tensometru T3 904 ADU.

Tab. 5.16. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 17

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1086	159	885	1357	590	970	1038	423	903
Przejście 2	1060	123	885	1196	525	898	1075	389	904

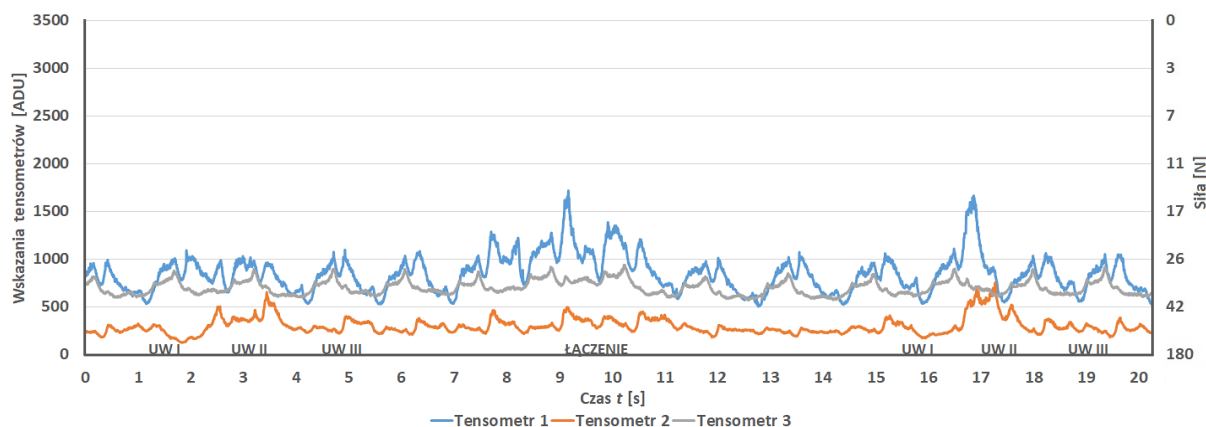


Rys. 5.78. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_0 = 80$ obr/min (oprac. własne)

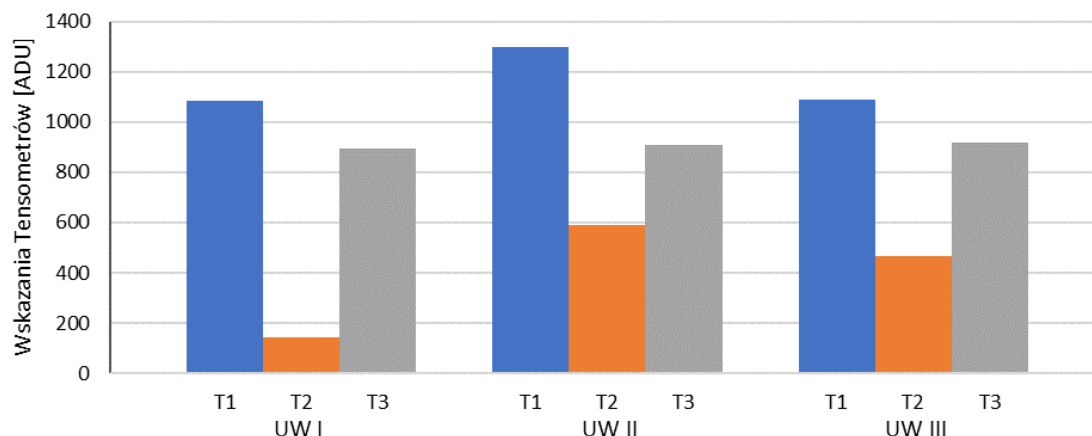
Podczas pomiaru nr 20 otrzymano wartości wskazań, pozwalających identyfikować uszkodzenia, przedstawione w tabeli 5.17 oraz zwizualizowane na rysunku 5.79. Najmniejsza wartość wskazania, odpowiadająca uszkodzeniu UW I dla tensometru T2 jest widoczna w zakresie pomiędzy 1,4-2,4 s i dla przejścia 1 wynosiła 122 ADU. Największa wartość wskazania tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1053 ADU natomiast tensometru T3 877 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie wpłynęło na przebieg sygnału w przejściu 2 pomiędzy 15,4-16,3 s. Na wykresie krzywa przebiegu sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu powtórным zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w przejściu 2 wyniosła 168 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał największą wartość 1058 ADU oraz tensometr T3 wskazał 843 ADU. Wskazania tensometru T3 wykazują mniejsze zmiany niż tensometr T2 oraz tensometru T1 w przebiegach sygnału w okolicy miejsca uszkodzenia UW I. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 2,7-3,8 s, tensometr T2 wskazał wtedy największą wartość 652 ADU natomiast zewnętrzny tensometr T1 wskazał największą wartość 1028 ADU, a tensometr T3 894 ADU. W przypadku „przejścia 2” uszkodzenie występuje pomiędzy 16,7-17,7 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 718 ADU oraz 1664 ADU dla tensometru T1 i 898 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć charakterystyczny zaburzony przebieg wartości dla tensometru T2 jak również tensometrów T1 oraz T3. Zakres występowania uszkodzenia o oznaczeniu UW III pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 4,5-5,8 s, w którym tensometry wskazały wartości odpowiednio 397 ADU w przypadku tensometru T2 i 1097 ADU dla tensometru T1 oraz 895 ADU dla tensometru T3. Zakres zakłóconych wskazań dla uszkodzenia UW III w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 18,7-19,8 s. Wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 373 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1061 ADU oraz wskazanie tensometru T3 osiągnęło 892 ADU.

Tab. 5.17. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 20

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1053	122	877	1028	652	894	1097	397	895
Przejście 2	1058	168	843	1664	718	898	1061	373	892



Rys. 5.79. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_0 = 80/\text{obr}/\text{min}$ (oprac. własne)



Rys. 5.80. Zestawienie wskazań nacisku taśmy, prędkość $n_0 = 80$ obr/min (oprac. własne)

Z zestawienia na powyższym rysunku 5.80 można zaobserwować, że w porównaniu do wzorcowego sygnału przebiegu nieuszkodzonej taśmy, występują charakterystyczne, powtarzalne i identyfikowalne zakłócenia sygnałów umożliwiające wykrywanie i identyfikowanie uszkodzenia taśmy przenośnikowej. Podczas pomiarów przy prędkości $n_0 = 80$ obr/min uszkodzenie UW I wygenerowało najbardziej zróżnicowany rozkład nacisków na tensometry w porównaniu do pozostałych uszkodzeń. Tensometr T2 wskazał wzrost nacisku, podczas gdy pozostałe tensometry wskazały znaczny spadek tj. wzrost wartości na wykresie. Charakter przebiegu odmienny od tego, jaki miał miejsce w przypadku pozostałych dwóch uszkodzeń, wynika z faktu, że uszkodzenie UW I powodowało lokalny wzrost nacisku na powierzchnię tensometru. Uszkodzenie UW II generuje najbardziej zbliżone wartości wskazań wszystkich tensometrów, jednak nadal są one asymetryczne. Zauważalny jest znaczny wzrost wartości T1, również tensometr T2 wskazał największy wzrost wartości. Uszkodzenie UW III, podobnie jak pozostałe, wygenerowało asymetryczne obciążenie, przy czym rozkład wartości jest zbliżony jak w przypadku uszkodzenia UW II. Skrajne tensometry wskazały mniejszą wartość nacisku, co jest w zgodzie z oczekiwaniami w przypadku danego charakteru uszkodzenia, tj. niecałkowitego przecięcia taśmy przenośnikowej.

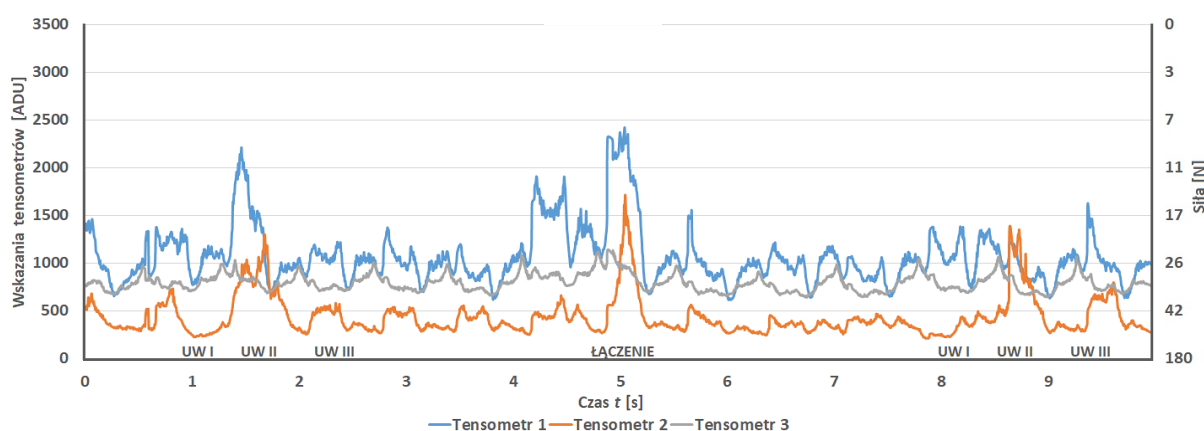
Etap 1, prędkość 159 obr/min

Podczas pomiaru nr 1 dla zwiększonej do $n_1 = 159$ obr/min prędkości obrotowej otrzymane wartości wskazań, pozwalających rozpoznać uszkodzenia taśmy, zostały przedstawione w tabeli 5.18 oraz zwizualizowane na rysunku 5.81. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2, odpowiadająca uszkodzeniu UW I, jest widoczna w zakresie pomiędzy 0,5-1,3 s i dla przejścia 1 wynosiła 221 ADU. Największa wartość wskazania tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1378 ADU natomiast tensometr T3 972 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie zostało wskazane w przejściu 2 pomiędzy 7,7-8,4 s. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnie jak w przypadku pierwszego przejścia. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w drugim przejściu wyniosła 207 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał największą wartość 1379 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1043 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 1,5-2,0 s, środkowy tensometr T2 wskazał wtedy 1035 ADU natomiast zewnętrzne tensometry wskazały T1 2209 ADU, a T3 1030 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 8,5-9,2 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 1159 ADU oraz 1383 ADU dla tensometru T1 i 1061 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć charakterystyczny zaburzony przebieg wartości zarówno dla wskazań tensometru T2, jak również zewnętrznych tensometrów T1 oraz T3.

Zakres występowania zmian wskazań, wywołanych przez uszkodzenie o oznaczeniu UW III, odpowiada w przejściu 1 odcinkowi 2,1-2,8 s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 654 ADU w przypadku tensometru T2 i 1246 ADU dla tensometru T1 oraz 967 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie UW III w przejściu nr 2 zarejestrowano pomiędzy 9,4-9,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 692 ADU, dla tensometru T1 było to 1574 ADU oraz dla tensometru T3 1065 ADU.

Tab. 5.18. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 1

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1378	221	972	2209	1035	1030	1246	654	967
Przejście 2	1379	207	1043	1383	1159	1061	1574	692	1065

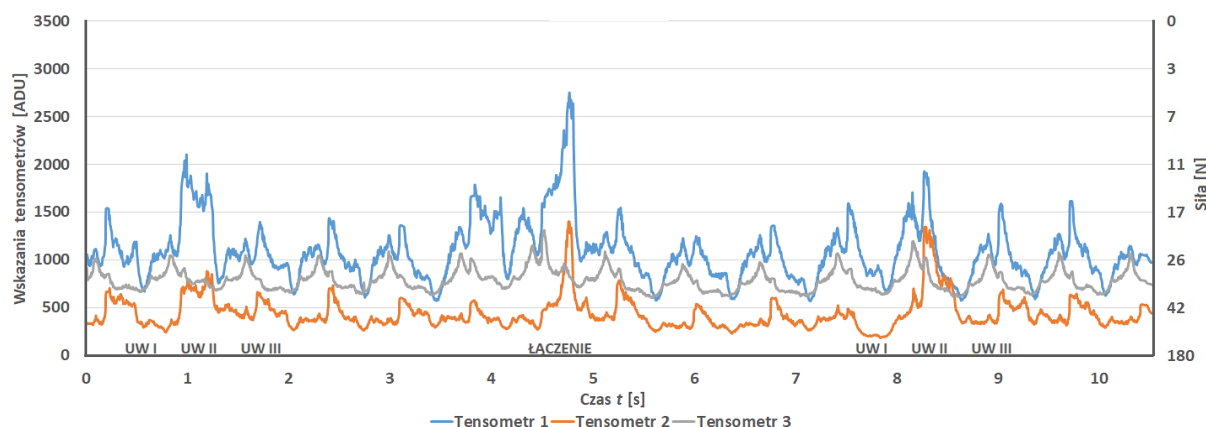


Rys. 5.81. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 6 przy prędkości obrotowej $n_l = 159$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.19 oraz zwizualizowane na rysunku 5.82. Najmniejsza wartość wskazania w przypadku uszkodzenia UW I dla tensometru T2, jaka wystąpiła w zakresie pomiędzy 0,4-0,8 s, dla przejścia 1 wynosiła 245 ADU. Największa wartość wskazań tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1594 ADU natomiast tensometru T3 840 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie zostało wykryte w przejściu 2 pomiędzy 7,6-8,1 s. Na wykresie krzywa przebiegu sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w drugim wyniosła 186 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1483 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1072 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 0,9-1,5 s, tensometr T2 wskazał wtedy 885 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2103 ADU, a tensometr T3 1048 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 8,2-8,8 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 1347 ADU oraz 1867 ADU dla tensometru T1 i 1196 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując wykrywanie uszkodzenia UW II, można zauważyć charakterystyczny wzrost wartości sygnału dla wszystkich trzech tensometrów. Sygnały identyfikujące uszkodzenie UW III w przypadku przejścia 1 znajdują się pomiędzy 1,6-2,0 s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 746 ADU w przypadku tensometru T2 i 1370 ADU dla tensometru T1 oraz 1022 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW III w przejściu nr 2 występują pomiędzy 8,6- 9,5 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 691 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1592 ADU oraz wskazanie tensometru T3 osiągnęło 1067 ADU.

Tab. 5.19. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 6

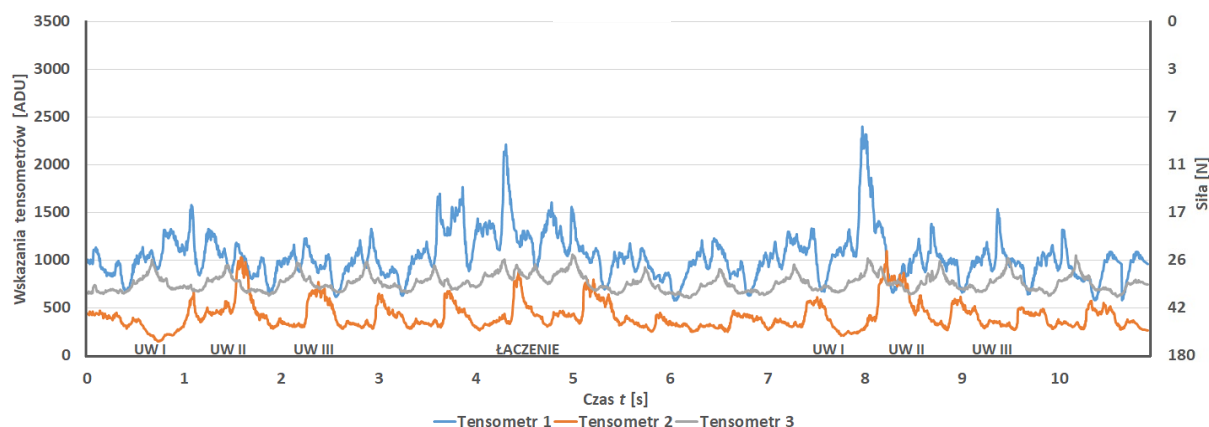
Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
Tensometr	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1594	245	840	2103	885	1048	1370	746	1022
Przejście 2	1483	186	1072	1867	1347	1196	1592	691	1067

**Rys. 5.82.** Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_I = 159$ obr/min (oprac. własne)

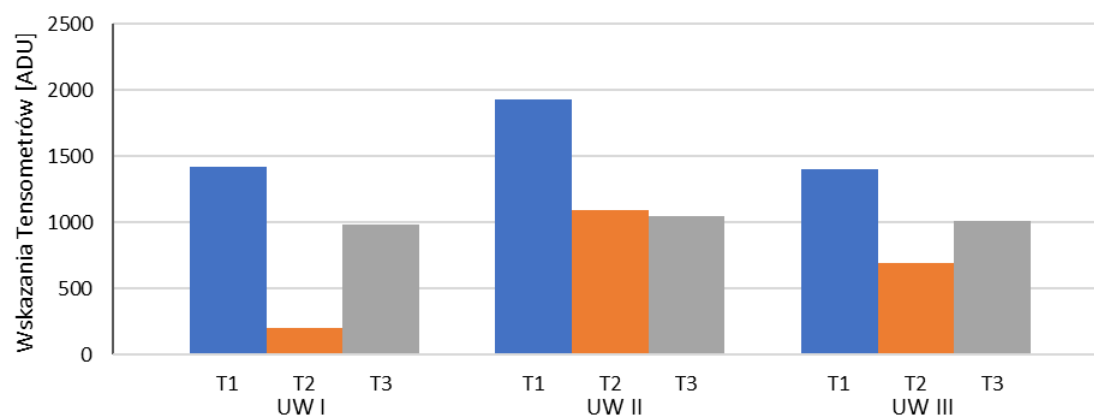
Pomiar nr 9 odbywał się przy prędkości obrotowej $n_I = 159$ obr/min, dla trzech uszkodzeń otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.20 oraz zwizualizowane na rysunku 5.83. Najmniejsza wartość wskazania, odpowiadająca identyfikacji uszkodzenia UW I, dla tensometru T2 jest widoczna w zakresie pomiędzy 0,3-0,8 s i dla przejścia 1 wynosiła 150 ADU. Największa wartość wskazania tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1327 ADU natomiast tensometru T3 1005 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie zostały wskazane w przejściu 2 pomiędzy 7,3-7,8 s. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Ponownie ma miejsce znacząca różnica pomiędzy wskazaniami środkowego tensometru T2 a tensometrów zewnętrznych T1 i T3. Największa wartość wskazania tensometru T2 w drugim przejściu wyniosła 210 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1332 ADU oraz tensometr T3 wskazał 951 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 1,0-1,6 s, tensometr T2 wskazał wtedy największą wartość 1029 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1577 ADU, a tensometr T3 948 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 8,0-8,8 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 1094 ADU oraz 2401 ADU dla tensometru T1 i 1017 ADU jako największą wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć wzrost wartości sygnałów dla każdego z trzech tensometrów. Zakres występowania zakłóceń, wywołanych przez uszkodzenie o oznaczeniu UW III, dla przejścia 1 występuje pomiędzy 1,9-2,6 s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 770 ADU w przypadku tensometru T2 i 1231 ADU dla tensometru T1 oraz 969 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań, odpowiadających uszkodzeniu UW III w przejściu nr 2, występuje pomiędzy 9,0-9,8 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 615 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1382 ADU oraz wskazanie tensometru T3 osiągnęło 988 ADU.

Tab. 5.20. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 9

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1327	150	1005	1577	1029	948	1231	770	969
Przejście 2	1332	210	951	2401	1094	1017	1382	615	988



Rys. 5.83. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_I = 159$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.84. Zestawienie wskazań tensometrów, prędkość $n_I = 159$ obr/min (oprac. własne)

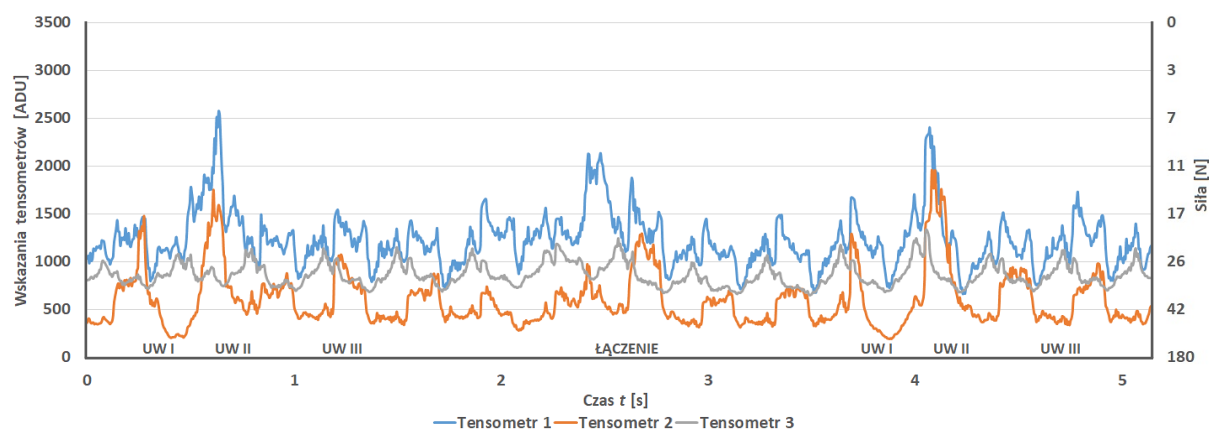
Rysunek 5.84 ilustruje, że w porównaniu do przebiegu nieuszkodzonej taśmy, tensometry wskazują charakterystyczne, powtarzalne i identyfikowalne zakłócenia sygnałów, bezpośrednio powiązane z uszkodzeniami taśmy przenośnikowej. Podczas pomiarów przy prędkości $n_I = 159$ obr/min uszkodzenie UW I podobnie jak przy prędkości $n_0 = 80$ obr/min, wygenerowało najbardziej zróżnicowany rozkład nacisków na tensometry w porównaniu do pozostałych uszkodzeń. Uszkodzenie generuje asymetryczny rozkład obciążeń, a tensometr T2 wskazał spadek wartości, odpowiadający lokalnemu wzrostowi nacisku. Pozostałe tensometry wskazały znaczny wzrost wartości wskazań. Uszkodzenie UW II wygenerowało zbliżone wartości wskazań dla T2 oraz T3, zauważalny jest znaczny wzrost wartości T1, a T2 wskazał największe wartości w odniesieniu do pozostałych zakłóceń związanych z zadanymi uszkodzeniami. Uszkodzenie UW III wygenerowało asymetryczne obciążenie, rozkład wartości jest zbliżony jak w przypadku uszkodzenia UW I, dla T1 zauważalne są największe wartości wskazań, natomiast wskazania T3 miały zbliżoną wartość jak w przypadku pozostałych rejestrowanych uszkodzeń.

Etap 1, prędkość 318 obr/min

W trakcie pomiaru nr 2 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.21 oraz zwizualizowane na rysunku 5.85. Najmniejsza wartość wskazania w przypadku uszkodzenia UW I dla tensometru T2 jest widoczne w zakresie pomiędzy 0,1-0,5 s i dla przejścia 1 wynosiła 204 ADU. Największa wartość wskazań tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1467 ADU, natomiast tensometru T3 1077 ADU. Po pełnym przejściu taśmy wpływ uszkodzenia UW I ponownie został uwidoczniiony w przejściu 2 pomiędzy 3,5-3,9 s. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu zauważalnym zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w drugim przejściu wyniosła 193 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1669 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1171 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 0,6-1,0 s, tensometr T2 wskazał wtedy 1750 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2579 ADU, a tensometr T3 1129 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie zniekształca przebieg sygnału pomiędzy 4,0-4,4 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 1946 ADU oraz 2402 ADU dla tensometru T1 i 1398 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć wzrost wartości sygnałów wszystkich trzech tensometrów. Uszkodzenia o oznaczeniu UW III wywierają znaczący wpływ na przebieg zarejestrowanego sygnału w momencie przejścia 1 pomiędzy 1,1-1,6 s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1073 ADU w przypadku tensometru T2 i 1545 ADU dla tensometru T1 oraz 1083 ADU dla tensometru T3. Wskazania, umożliwiające identyfikacje obecności uszkodzenia UW III w przejściu nr 2, występują pomiędzy 4,5-5,0 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 978 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1732 ADU oraz wskazanie tensometru T3 osiągnęło 1118 ADU.

Tab. 5.21. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 2

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1467	204	1077	2579	1750	1129	1545	1073	1083
Przejście 2	1669	193	1171	2402	1946	1398	1732	978	1118

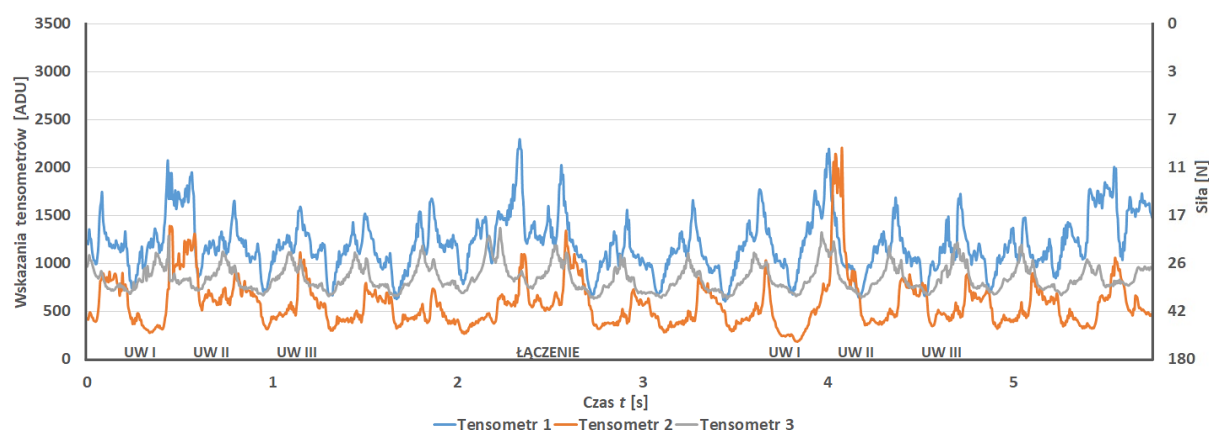


Rys. 5.85. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość 318 obr/min (oprac. własne)

Wyniki przedstawione w tabeli 5.22 oraz zwizualizowane na rysunku 5.86 dotyczą pomiaru nr 8 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min. Otrzymana najmniejsza wartość wskazania w przypadku uszkodzenia UW I dla tensometru T2 jest widoczna w zakresie pomiędzy 0,0-0,3 s i dla przejścia 1 wynosiła 276 ADU. Największa wartość tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1742 ADU, natomiast tensometru T3 1077 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie zostało wskazane przez tensometry w przejściu 2 pomiędzy 3,4-3,9 s. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Również największa wartość dla tensometru T3 dla pierwszego przejścia była tożsama z odczytami tego samego uszkodzenia jak przy wcześniejszym pomiarze nr 2 (tab. 5.21). Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w drugim wyniosła 182 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1771 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1079 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 0,4-0,8 s, tensometr T2 wskazał wtedy największą wartość 1333 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2074 ADU, a tensometr T3 1285 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 4,0-4,4. s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 2095 ADU oraz 2199 ADU dla tensometru T1 i 1270 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można ponownie zauważyć wzrost wartości sygnałów podobnie jak we wcześniejszych pomiarach. Uszkodzenia o oznaczeniu UW III pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,9-1,4. s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1115 ADU w przypadku tensometru T2 i 1545 ADU dla tensometru T1 oraz 1591 ADU dla tensometru T3. Wskazania dla uszkodzenia UW III w przejściu nr 2 występują pomiędzy 4,5-5,0 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 834 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1687 ADU oraz wskazanie tensometru T3 osiągnęło 1111 ADU.

Tab. 5.22. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 8

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1742	276	1077	2074	1333	1285	1591	1115	1114
Przejście 2	1771	182	1079	2199	2095	1270	1687	834	1111

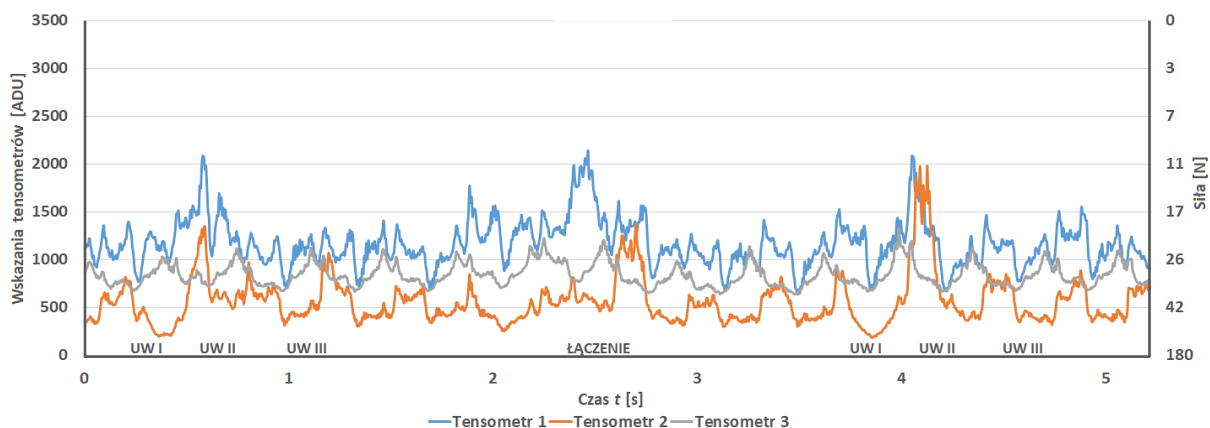


Rys. 5.86. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość 318 obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 10 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.23 oraz zwizualizowane na rysunku 5.87. Najmniejsza wartość wskazania w przypadku uszkodzenia UW I dla tensometru T2 jest widoczne w zakresie pomiędzy 0,1-0,3 s i dla przejścia 1 wynosiła 195 ADU. Największa wartość wskazania tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1367 ADU natomiast tensometru T3 1025 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie wpłynęło na przebieg sygnału w przejściu 2 pomiędzy 3,4-3,9 s. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Największa wartość wskazania tensometru T2 w drugim przejściu wyniosła 182 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1520 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1064 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 0,5-0,9 s, tensometr T2 wskazał wtedy 1348 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2089 ADU, a tensometr T3 1074 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 4,0-4,4. s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o wartości 1983 ADU oraz 2072 ADU dla tensometru T1 i 1258 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć skok amplitudy sygnałów. Uszkodzenie o oznaczeniu UW III pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 1,0-1,5 s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1035 ADU w przypadku tensometru T2 i 1331 ADU dla tensometru T1 oraz 1126 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW III w przebiegu nr 2 występują pomiędzy 4,5-4,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 886 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1463 ADU oraz wskazanie tensometru T3 osiągnęło największą wartość 1122 ADU.

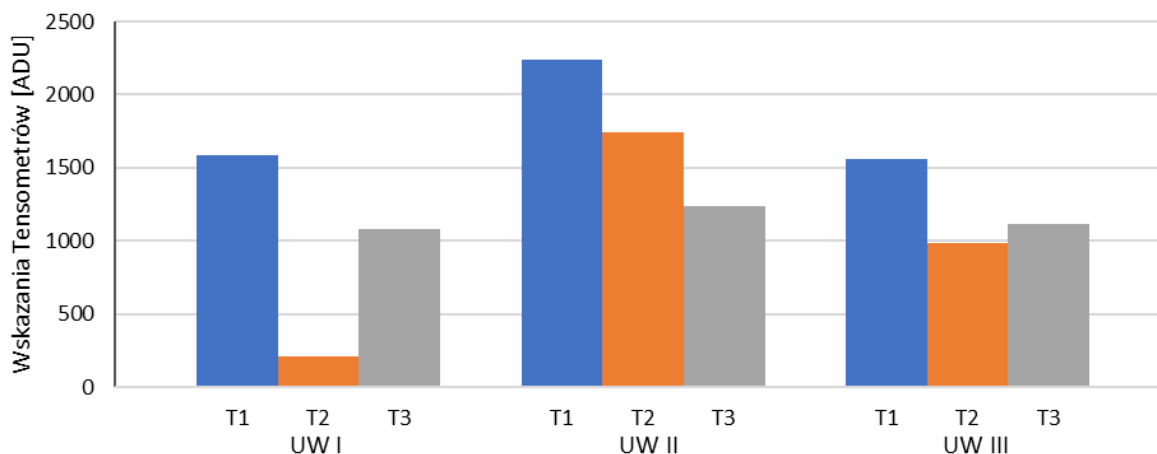
Tab. 5.23. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 10

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1367	195	1025	2089	1348	1074	1331	1035	1126
Przejście 2	1520	182	1064	2072	1983	1258	1463	886	1122



Rys. 5.87. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

Z zestawienia zbiorczego na rysunku 5.88 można zaobserwować, że w porównaniu do przebiegu nieuszkodzonej taśmy, występują zauważalne, powtarzalne i identyfikowalne zakłócenia sygnałów umożliwiające wykrywanie i identyfikowanie uszkodzenia taśmy przenośnikowej. Podczas pomiarów przy prędkości $n_2 = 318$ obr/min uszkodzenie UW I, podobnie jak przy mniejszych wartościach prędkości obrotowych, wygenerowało asymetryczny rozkład nacisków na tensometry.



Rys. 5.88. Zestawienie wskazań nacisku taśmy, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

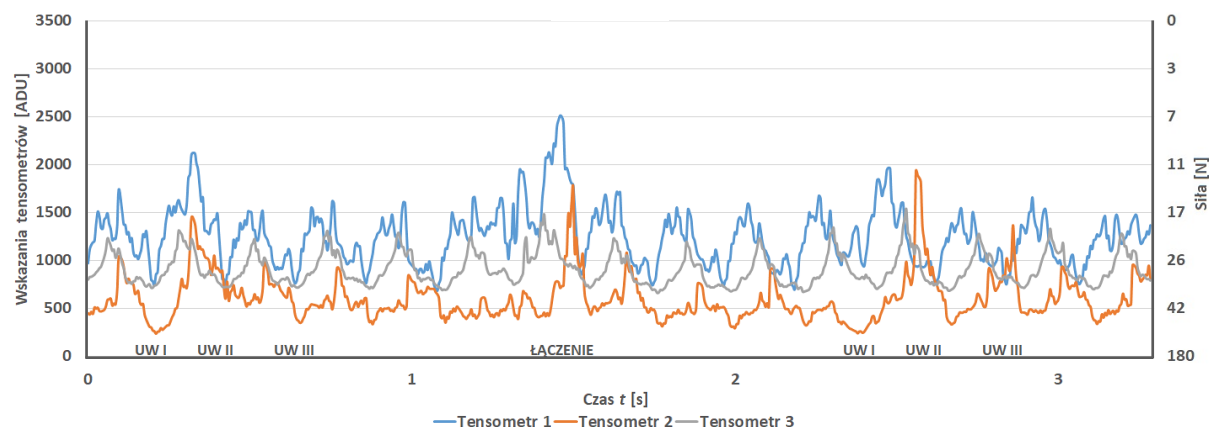
Tensometr T2 wskazał znaczny spadek wartości, podczas gdy pozostałe tensometry wskazały widoczny wzrost wartości. Uszkodzenie UW II wygenerowało największe wartości dla wszystkich trzech tensometrów, zauważalny jest znaczny wzrost wartości T1 oraz T2. Tensometry wskazały największe wartości w porównaniu do pozostałych uszkodzeń. Uszkodzenie UW III również wygenerowało asymetryczne obciążenie, jednak o najmniej zmiennym rozkładzie, podobnie jak dla uszkodzenia UW I nastąpił spadek siły nacisku na tensometr T2, a T1 wskazał największą wartość.

Etap 1, prędkość 540 obr/min

Ostatnim etapem badań odbywał się przy prędkości obrotowej bębnowej $n_3 = 540$ obr /min z trzema uszkodzeniami taśmy. W trakcie pomiaru nr 5 otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.24 oraz zwizualizowane na rysunku 5.89. Najmniejsza wartość wskazania w przypadku uszkodzenia UW I dla tensometru T2 jest widoczna w zakresie pomiędzy 0,0-0,2 s i dla przejścia 1 wynosiła 234 ADU. Największa wartość tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1743 ADU natomiast tensometru T3 1199 ADU. Po pełnym przejściu taśmy punkty odpowiadające uszkodzeniu UW I ponownie zostały wskazane w przejściu 2 pomiędzy 2,2-2,4 s Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w drugim przejściu wyniosła 238 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1678 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1342 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 0.3-0,6 s, tensometr T2 wskazał wtedy 1451 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2121 ADU, a tensometr T3 1291 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 2,5-2,7 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 1892 ADU oraz 1969 ADU dla tensometru T1 i 1537 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały odpowiadające uszkodzeniu UW II, można zauważyć wzrost wartości sygnałów wszystkich trzech tensometrów. Uszkodzenie o oznaczeniu UW III pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,7-0,9 s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 977 ADU w przypadku tensometru T2 i 1516 ADU dla tensometru T1 oraz 1220 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW III w przejściu nr 2 występują pomiędzy 2,5-2,8 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1068 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1659 ADU oraz wskazanie tensometru T3 osiągnęło 1230 ADU.

Tab. 5.24. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 5

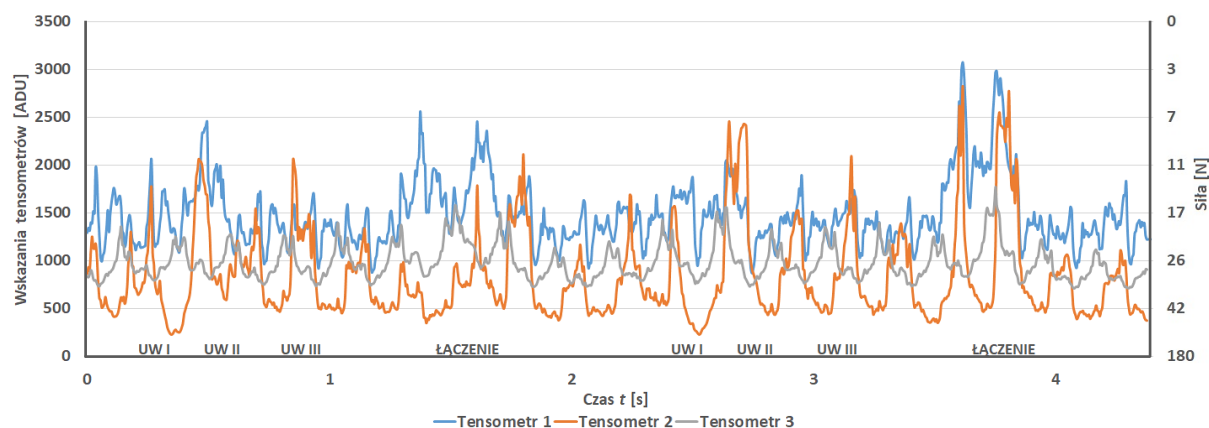
Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
Tensometr	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1743	234	1199	2121	1451	1291	1516	977	1220
Przejście 2	1678	238	1342	1969	1892	1537	1659	1068	1230

**Rys. 5.89.** Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 6 przy prędkości obrotowej $n_3 = 514$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.25 oraz zwizualizowane na rysunku 5.90. Najmniejsza wartość wskazania w przypadku uszkodzenia UW I dla tensometru T2 jest widoczna w zakresie pomiędzy 0,0-0,2 s i dla przejściu 1 wynosiła 227 ADU. Największa wartość wskazań tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 2061 ADU natomiast tensometru T3 1353 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie wywołało zakłócenia w przejściu 2 pomiędzy 2,3-2,5 s. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnie jak dla pierwszego przejścia. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w drugim przejściu wyniosła 227 ADU, tj. otrzymano taka sama wartość jak w pierwszym przebiegu, natomiast tensometr T1 wskazał 1870 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1425 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 0,3-0,6 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2042 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2456 ADU, a tensometr T3 1251 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 2,6-2,9 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 1992 ADU oraz 1581 ADU dla tensometru T1 i 1251 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Analizując sygnały dla uszkodzenia UW II można zauważyć wzrost wartości sygnałów wszystkich trzech tensometrów, szczególnie podczas drugiego przejścia. Zakresy wskazań uszkodzenia o oznaczeniu UW III pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,7-1,0 s, w którym tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1992 ADU w przypadku tensometru T2 i 1581 ADU dla tensometru T1 oraz 1251 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań, odpowiadających oddziaływaniu uszkodzenia UW III w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 3,0-3,3 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2086 ADU, natomiast dla tensometru T1 było to 1540 ADU oraz największe wskazanie tensometru T3 osiągnęło 1347 ADU.

Tab. 5.25. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 6

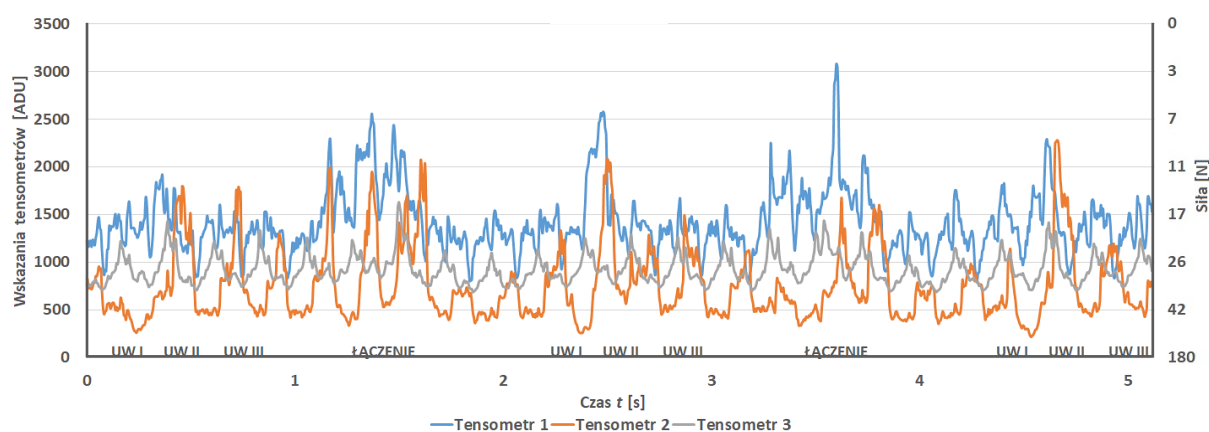
Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
Tensometr	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	2061	227	1353	2456	2042	1251	1581	1992	1251
Przejście 2	1870	227	1425	2052	2459	1554	1540	2086	1347

**Rys. 5.90.** Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

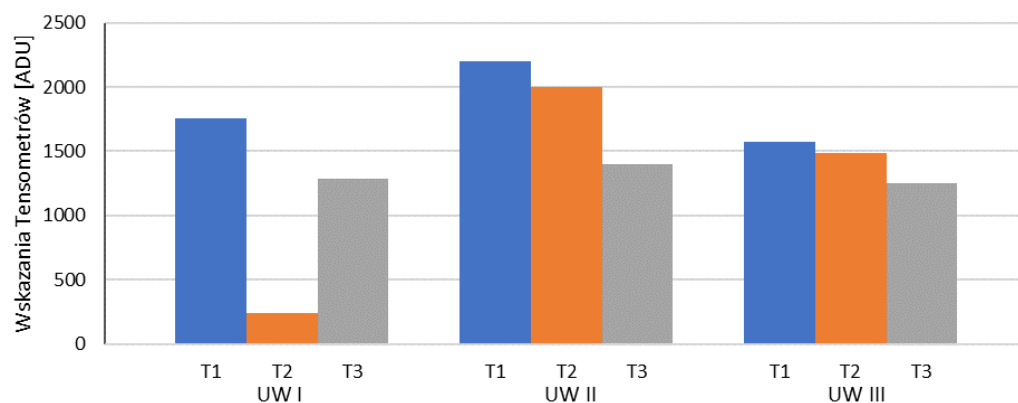
Podczas pomiaru nr 8 przy prędkości obrotowej $n_3 = 540$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.26 oraz zwizualizowane na rysunku 5.91. Najmniejsza wartość wskazania w przypadku uszkodzenia UW I dla tensometru T2 została zarejestrowana w zakresie pomiędzy 0,0-0,2 s i dla przejścia 1 wynosiła 261 ADU. Największa wartość wskazania tensometru T1 w tym przedziale wyniosła 1641 ADU natomiast tensometru T3 1226 ADU. Po pełnym przejściu taśmy uszkodzenie UW I ponownie wpłynęło na przebieg sygnału w przejściu 2 pomiędzy 2,2-2,4 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w drugim przejściu wyniosła 258 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał największą wartość 1615 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1253 ADU. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 w trzecim przejściu została zarejestrowana pomiędzy 4,3-4,5 s i wyniosła 218 ADU, tensometr T1 wskazał największą wartość 1702 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1235 ADU. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 0,3-0,6 s, tensometr T2 wskazał wtedy 1801 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1919 ADU, a tensometr T3 1431 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 2,5-2,7 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 2065 ADU oraz 2583 ADU dla tensometru T1 i 1298 ADU jako wartość wskazania tensometru T3. W przypadku przejścia 3 uszkodzenie występuje pomiędzy 4,6-4,8 s i jest identyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 2284 ADU oraz 2295 ADU dla tensometru T1 i 1417 ADU jako największą wartość wskazania tensometru T3. Uszkodzenia o oznaczeniu UW III pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,7-1,0 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1745 ADU w przypadku tensometru T2 i 1373 ADU dla tensometru T1 oraz 1217 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW III w przejściu nr 2 występują pomiędzy 2,8-3,0 s. Wartość największego wskazania tensometru T2 wyniosła 1412 ADU, dla tensometru T1 było to 1669 ADU oraz tensometru T3 1267 ADU. Zakres występowania uszkodzenia UW III w przejściu nr 3 występują pomiędzy 4,9-5,1 s, w którym tensometr T2 wskazał 1114 ADU, tensometru T1 pokazał 1662 ADU oraz 1248 ADU dla tensometru T3. Zestawienie zbiorcze wskazań tensometrów ukazano na rys. 5.90.

Tab. 5.26. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 8

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1641	261	1226	1919	1801	1431	1373	1745	1217
Przejście 2	1615	258	1253	2583	2065	1298	1669	1412	1267
Przejście 3	1702	218	1235	2295	2284	1417	1662	1114	1248



Rys. 5.91. Wskazania tensometrów, 3 uszkodzenia, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

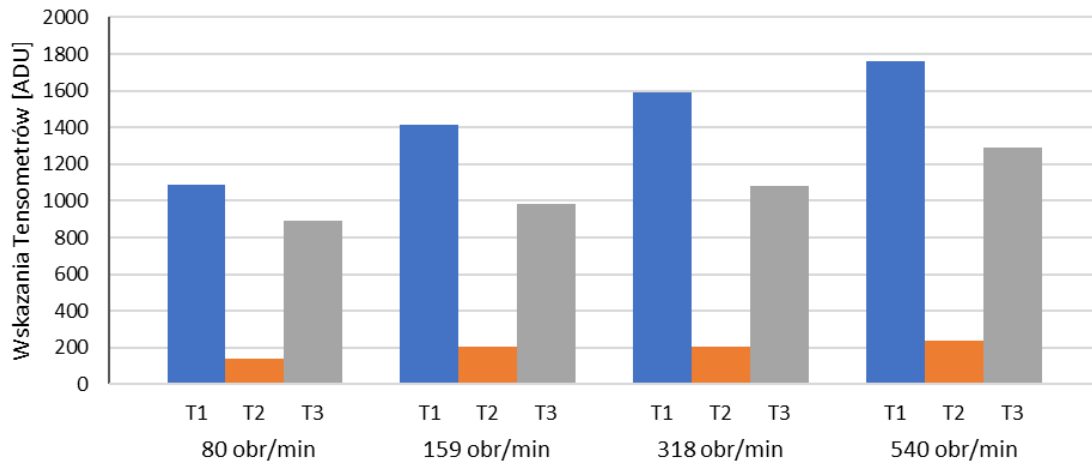


Rys. 5.92. Zestawienie wskazań nacisku taśmy, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

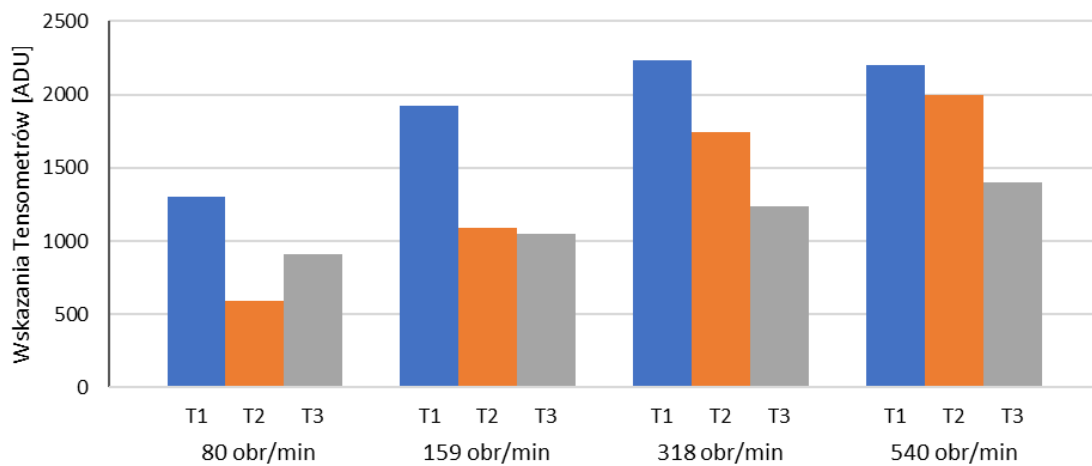
Z zestawienia na powyższym rysunku 5.92 można zaobserwować, że zarejestrowane przebiegi zawierają charakterystyczne, powtarzalne i identyfikowalne cechy umożliwiające wykrywanie i identyfikowanie uszkodzenia taśmy przenośnikowej. Podczas pomiarów przy prędkości $n_3=540$ obr/min uszkodzenie UW I, podobnie jak przy pozostałych mniejszych wartościach prędkości obrotowych, spowodowało, że tensometry wykazały najbardziej asymetryczny rozkład wartości. Tensometr T2 wskazał znaczny spadek wartości, odzwierciedlający charakter uszkodzenia na taśmie tj. lokalny wzrost nacisku na powierzchnię tensometru. Pozostałe tensometry wskazały wzrost wartości, które było największe dla T1. Uszkodzenie UW II wygenerowało największe wartości dla wszystkich trzech tensometrów. Tensometr T1 wskazał największe wartości w porównaniu do pozostałych. Uszkodzenie UW III również wygenerowało obciążenie o najmniej zmiennym rozkładzie wskazań, podobnie jak dla uszkodzenie UW II nastąpił spadek siły nacisku na tensometr T2, tj. wzrost wartości na wykresie, a T1 wskazał największa wartość, co sugeruje to najmniejszą wielkość uszkodzenia taśmy.

Podsumowanie Etapu 1

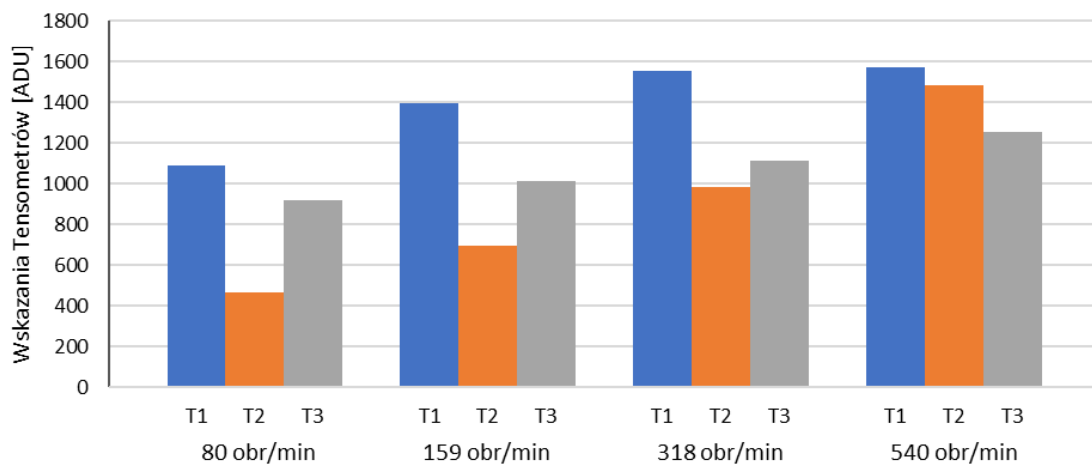
Wpływ prędkości na charakterystyczne wartości wskazań tensometrów jest widoczny na wykresach zbiorczych na rysunkach 5.93-5.95, odpowiednio dla uszkodzeń UW I, UW II i UW III. Jak widać, uszkodzenia generują wzrost wartości wskazań wraz ze wzrostem prędkości obrotowej bębna, ale też zmieniają charakter rozkładu nacisków na poszczególne tensometry.



Rys. 5.93. Zestawienie wskazań nacisku taśmy, uszkodzenie UW I (oprac. własne)



Rys. 5.94. Zestawienie wskazań nacisku taśmy, uszkodzenie UW II (oprac. własne)



Rys. 5.95. Zestawienie wskazań tensometrów, uszkodzenie UW III (oprac. własne)

Dla prędkości w zakresie pomiędzy 80 - 318 obr/min jest szczególnie widoczny wzrost wartości wskazań tensometrów. Uszkodzenie UW I wygenerowało inny rozkład nacisków na tensometry niż pozostałe dwa (środkowy tensometr jest znacznie bardziej obciążony). Zasadniczo podobnie wygląda rozkład UW II oraz UW III, choć przy małej prędkości mniej obciążone są tensometry zewnętrzne T1 i T3. Tymczasem UWII generuje asymetryczne obciążenie, od prędkości $n_1 = 159$ obr/min następuje zrównanie się wartości wskazań T2 i T3, następnie przy wyższych prędkościach obrotowych tensometr T2 wskazuje mniejszy nacisk. Podobny efekt jest zauważalny dla uszkodzenia UW III. Wobec występowania charakterystycznych zmian w przebiegu wskazań tensometrów, można stwierdzić, że oddziaływanie taśmy uszkodzonej na tensometryczny układ pomiarowy pozwala na wykrywanie uszkodzeń taśmy przenośnikowej. W ten sposób została udowodniona trzecia teza pomocnicza.

Etap 2, prędkość 159 obr/min

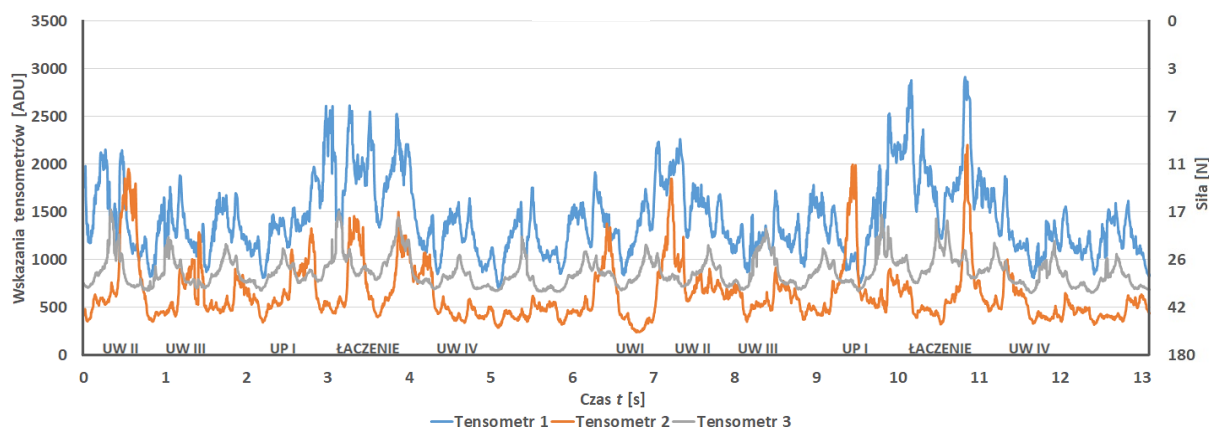
W drugim etapie analizie poddano wpływ pięciu uszkodzeń, trzech wzdłużnych i dwóch poprzecznych, na przebiegi wskazań systemu monitorującego. Przykładowo w trakcie pomiaru nr 8 przy prędkości obrotowej $n_1 = 159$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.27 oraz zwizualizowane na rysunku 5.96. Wskazania, pozwalające zidentyfikować obecność uszkodzenia UW I, w drugim przejściu występują pomiędzy 6,6-7,0 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru w tym czasie T2 wyniosła 243 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1916 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1115 ADU. Na wykresie krzywa przebiegu sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem, podobnym do zarejestrowanego podczas etapu 1. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest zidentyfikowane pomiędzy 0,1-0,8 s, tensometr T2 wskazał wtedy 1954 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 2035 ADU, a tensometr T3 1455 ADU. W przypadku przejścia 2 uszkodzenie występuje pomiędzy 7,2-7,8 s i jest zidentyfikowane przez tensometr T2 wskazaniem o największej wartości 1852 ADU oraz 2261 ADU dla tensometru T1 i 1150 ADU jako największa wartość wskazania tensometru T3. Uszkodzenia o oznaczeniu UW III pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 1,0-1,5 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1376 ADU w przypadku tensometru T2 i 1882 ADU dla tensometru T1 oraz 1235 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW III w przejściu nr 2 występują pomiędzy 7,2-7,8 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 992 ADU, dla tensometru T1 było to 1654 ADU oraz tensometru T3 1325 ADU.

Poprzeczne uszkodzenie UP I w pierwszym przejściu znajduje się w bezpośrednim kontakcie z bębnem zwrotnym pomiędzy 2,2-2,7 s, zauważalnie oddziałując na tensometry. Największa wartość wskazania środkowego tensometru T2 wyniosła 1331 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1942 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1116 ADU. W drugim przejściu wpływ uszkodzenia UP I zarejestrowano w zakresie między 9,1-9,7 s, a największe wartości wskazań wynosiły dla tensometru T2 1997 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1987 ADU, a tensometr T3 1083 ADU. Zwraca na siebie uwagę duży rozrzut wskazań tensometru środkowego T2, większy o 50% w drugim przejściu. Wskazania tensometru T1, znajdującego się w pobliżu uszkodzenia poprzecznego, nie zmieniły się tak znacząco.

Kolejne uszkodzenie wzdłużne UW IV w pierwszym przejściu zauważalnie wpływa na wskazania w zakresie między 4,3-4,8 s. W trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 1264 ADU z tensometru T2, a z tensometru T1 1642 ADU oraz 1049 z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 11,3-11,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1005 ADU, dla tensometru T1 było to 1814 ADU oraz tensometru T3 1175 ADU.

Tab. 5.27. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 8

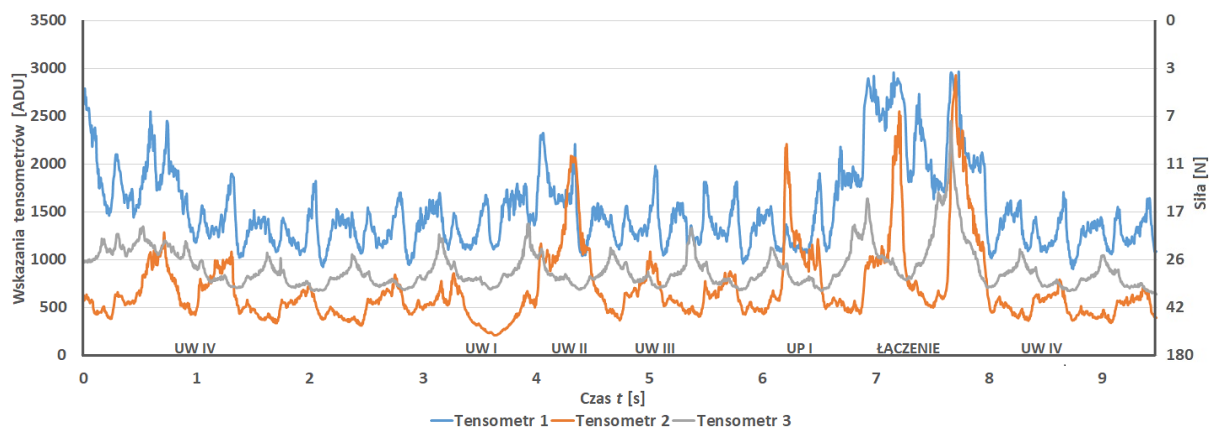
Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Tensometr															
Przejście 1	-	-	-	2035	1954	1455	1882	1376	1235	1942	1331	1116	1642	1264	1049
Przejście 2	1916	243	1155	2261	1852	1150	1654	992	1325	1987	1997	1083	1814	1005	1175

**Rys. 5.96.** Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

Podczas pomiaru nr 9 dla prędkości obrotowej $n_l = 159$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.28 oraz zwizualizowane na rysunku 5.97. Wartości wskazań, pozwalających wykryć uszkodzenie UW I, w drugim przejściu występują pomiędzy 3,1-3,9. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 207 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1697 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1263 ADU. Ponownie, jak w innych eksperymentach, w przebiegu sygnału tensometru T2 można odnotować charakterystyczne zagłębienie. Uszkodzenie UW II w przypadku przejścia 2 jest identyfikowane na odcinku 4,0-4,7 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2083 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2323 ADU, a tensometr T3 1373 ADU. Uszkodzenie o oznaczeniu UW III znajduje się w kontakcie z bębniem zwrotnym w przejściu 2 pomiędzy 4,8-5,4 s. W tym czasie tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1082 ADU w przypadku tensometru T2 i 1979 ADU dla tensometru T1 oraz 1124 ADU dla tensometru T3. Poprzeczne uszkodzenie UP I w przejściu 2 zakłóca przebieg sygnału pomiędzy 6,1-6,5 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2202 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1819 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1127 ADU. W pierwszym przejściu uszkodzenie UW IV jest wykrywalne w zakresie pomiędzy 0,9-1,5 s w trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 1282 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 1891 ADU oraz 1193 z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 8,3-8,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1185 ADU, dla tensometru T1 było to 1616 ADU oraz tensometru T3 1065 ADU.

Tab. 5.28. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 9

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Tensometr															
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1891	1282	1193
Przejście 2	1697	207	1263	2323	2083	1373	1979	1082	1124	1819	2202	1127	1616	1185	1065

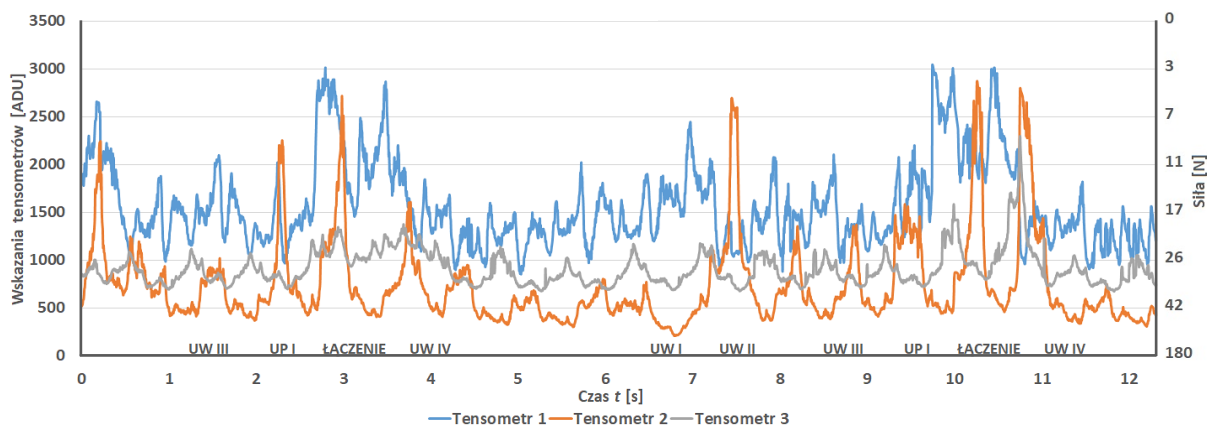


Rys. 5.97. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 13 przy prędkości obrotowej $n_l = 159$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.29 oraz zwiualizowano na rysunku 5.98. Wskazania, pozwalające zidentyfikować uszkodzenie UW I, w drugim przejściu występują w czasie pomiędzy 6,5-7,0 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 209 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1898 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1164 ADU. Na wykresie przebiegu sygnału tensometru T2 krzywa charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 2 jest identyfikowane pomiędzy 7.1-7,9 s, tensometr T2 wskazał największą wartość 2318 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2443 ADU, a tensometr T3 1171 ADU. Uszkodzenie o oznaczeniu UW III pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 1,1-1,7 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1021 ADU w przypadku tensometru T2 i 2095 ADU dla tensometru T1 oraz 1225 ADU dla tensometru T3. Uszkodzenie UW III w przejściu nr 2 występują pomiędzy 8,3-9,0 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1355 ADU, dla tensometru T1 było to 2073 ADU oraz tensometru T3 1106 ADU. Uszkodzenia UP I w pierwszym przejściu występują pomiędzy 2,0-2,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2255 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1942 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1116 ADU. W drugim przejściu odpowiednie zarejestrowane największe wartości w zakresie pomiędzy 9,2-9,7 s wyniosły dla tensometru T2 1581 ADU, dla tensometru T1 2196 ADU, a dla tensometru T3 1156 ADU. W pierwszym przejściu uszkodzenie UW IV jest wykrywalne w zakresie pomiędzy 3,8-4,4 s, a w trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 1604 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 1837 ADU i 1371 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań charakteryzujących uszkodzenie UW IV w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 11,2-11,8 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1394 ADU, dla tensometru T1 było to 1813 ADU oraz tensometru T3 1223 ADU.

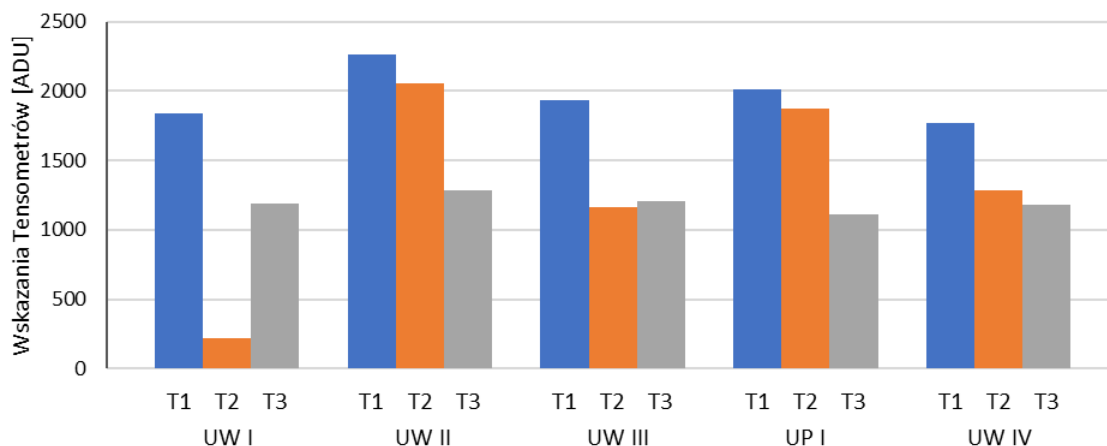
Tab. 5.29. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 13

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	2095	1021	1225	2130	2255	1078	1837	1604	1371
Przejście 2	1898	209	1164	2443	2318	1171	2073	1355	1106	2196	1581	1156	1813	1394	1223



Rys. 5.98. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

Z zestawienia zbiorczego na rysunku 5.99 można wnioskować, że przebiegi zawierają charakterystyczne, powtarzalne i identyfikowalne zakłócenia sygnałów w porównaniu do nieuszkodzonej taśmy. Różnice te umożliwiają wykrywanie i identyfikowanie uszkodzenia taśmy przenośnikowej. Podczas pomiarów przy prędkości $n_l = 159$ obr/min uszkodzenie UW I wygenerowało najbardziej asymetryczny rozkład nacisków na tensometry. Tensometr T2 wskazał największy spadek wartości odzwierciedlający lokalny wzrost nacisku taśmy, zewnętrzne tensometry wskazały znaczny wzrost wartości, przy czym największy odpowiada T1.



Rys. 5.99. Zestawienie wskazań tensometrów, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

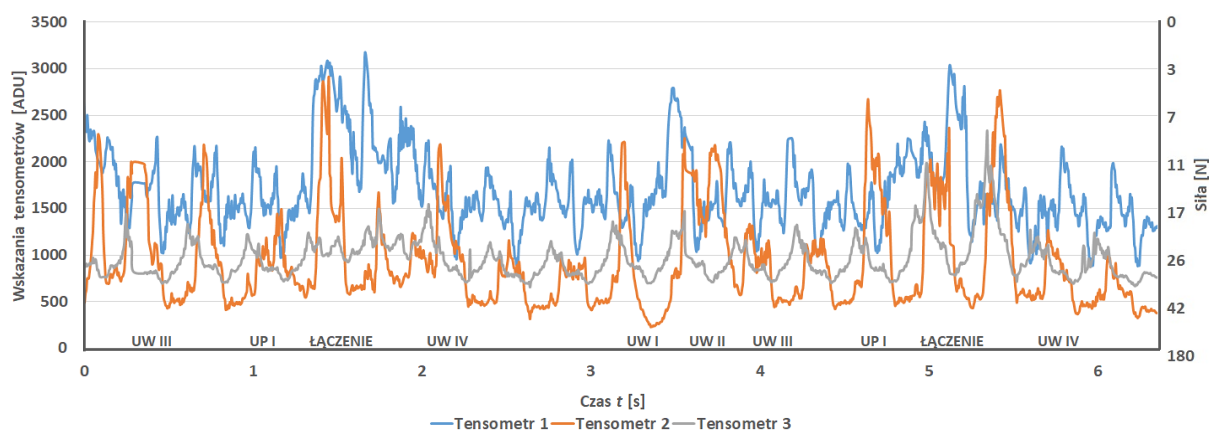
Uszkodzenie UW II wygenerowało największą wartość wskazania dla T1, również T2 jest mniej obciążony niż przy uszkodzeniu UW I, najmniejsza wartość wskazań przypada na T3. Uszkodzenie UW III wygenerowało zbliżone obciążenie dla T2 oraz T3, natomiast T1 osiągnął największe wartości wskazań. W drugim etapie badań pojawiające się uszkodzenie UP I wygenerowało rozkład wartości wskazań podobny jak dla uszkodzenie UW II widoczny jest spadek siły nacisku na T2. Uszkodzenie UW IV podobnie jak poprzednie również po raz pierwszy było rejestrowane w drugim etapie pomiarów, rozkład wartości wskazań jest podobny jak w przypadku uszkodzenia UW II, zauważalne są największe wartości wskazań dla T1 natomiast T3 wskazał zbliżoną wartość jak dla pozostałych rejestrowanych uszkodzeń.

Etap 2, prędkość 318 obr/min

Wyniki uzyskane w trakcie pomiaru nr 1 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min przedstawiono w tabeli 5.30 oraz zwizualizowano na rysunku 5.100. Wartości wskazań dla uszkodzenia UW I w drugim przejściu występują pomiędzy 3,1-3,4 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 228 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał największą wartość 1995 ADU, a tensometr T3 wskazał 1358 ADU. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 2 jest identyfikowane pomiędzy 3,4-3,8 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2254 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2370 ADU, a tensometr T3 1465 ADU. Uszkodzenie o oznaczeniu UW III wpływa na wskazania tensometrów w czasie przejścia 1 pomiędzy 0,1-0,6 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 2111 ADU w przypadku tensometru T2 i 2171 ADU dla tensometru T1 oraz 1330 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań, charakterystycznych dla uszkodzenia UW III, w przejściu nr 2 występują pomiędzy 3,9-4,3 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2179 ADU, dla tensometru T1 było to 2251 ADU oraz tensometru T3 1320 ADU. Uszkodzenie UP I w pierwszym przejściu wpływa bezpośrednio na sygnały tensometrów pomiędzy 0,8-1,2 s w pierwszym przejściu. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1478 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1952 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1222 ADU. W drugim przejściu zarejestrowana największa wartość w odpowiednim zakresie pomiędzy 4,5-4,9 s dla tensometru T2 wyniosła 2673 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2195 ADU, a tensometr T3 1259 ADU. W pierwszym przejściu uszkodzenie UW IV jest wykrywalne w zakresie pomiędzy 2,0-2,4 s, a w trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 2182 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 2220 ADU oraz 1544 z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 5,6-6,0 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1268 ADU, dla tensometru T1 było to 2162 ADU oraz dla tensometru T3 1234 ADU.

Tab. 5.30. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 1

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	2171	2111	1330	1952	1478	1222	2220	2182	1544
Przejście 2	1995	228	1358	2370	2254	1465	2251	2179	1320	2195	2673	1259	2162	1268	1234

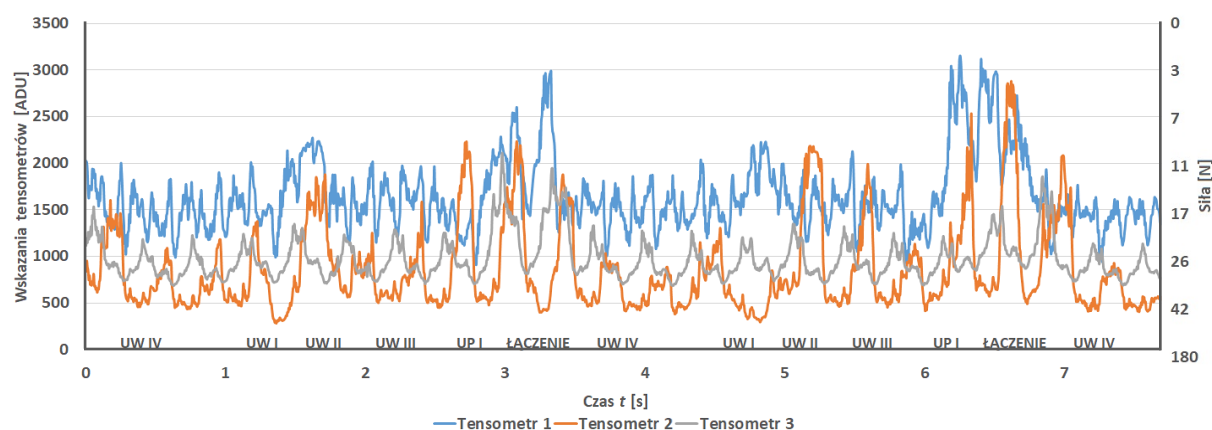


Rys. 5.100. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 3 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.31 oraz zwizualizowane na rysunku 5.101. Wskazania, wykrywające uszkodzenie UW I, w drugim przejściu występują pomiędzy 1,0-1,4 s. Najmniejsza wartość wskazań tensometru T2 wyniosła 286 ADU, tensometr T1 wskazał 2009 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1241 ADU. Identyfikacja uszkodzenia UW I w przejściu nr 3 możliwa jest pomiędzy 4,5-4,9 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 298 ADU, tensometr T1 wskazał 1872 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1204 ADU. Uszkodzenie UW II w przypadku przejścia 2 jest identyfikowane pomiędzy 1,5-1,9 s, tensometr T2 wskazał wtedy 1877 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2270 ADU, a tensometr T3 1348 ADU. W przypadku przejścia 3 jest identyfikowane pomiędzy 5,0-5,4 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2187 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2229 ADU, a tensometr T3 1349 ADU. Uszkodzenia UW III pojawiają się, w momencie przejścia 2 pomiędzy 2,0-2,5 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1398 ADU w przypadku tensometru T2 i 1925 ADU dla tensometru T1 oraz 1289 ADU dla tensometru T3. W przejściu nr 3 zakres występowania charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań jest pomiędzy 5,5-5,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1994 ADU, dla tensometru T1 było to 2126 ADU oraz tensometru T3 1322 ADU. Uszkodzenie UP I w przejściu 2 znajduje się w bezpośrednim kontakcie z bębniem zwrotnym pomiędzy 2,6-2,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2053 ADU, tensometr T1 wskazał 1825 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1670 ADU. W przejściu 3 zarejestrowane pomiędzy 6.0-6.3 s wartości wynosiły T2 1219 ADU dla tensometru, natomiast dla tensometru T1 1987 ADU, a tensometr T3 wskazał 1251 ADU. W pierwszym przejściu uszkodzenie UW IV jest wykrywalne w zakresie pomiędzy 0,1-0,5 s. W trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 1606 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 2001 ADU, a także 1535 z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,6-4,0 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1881 ADU, dla T1 było to 1807 ADU oraz 1740 ADU dla T3. Wskazania w przejściu 3 występują pomiędzy 7,0-7,4 s. Największa wartość wskazania T2 wyniosła 1742 ADU, dla tensometru T1 było to 1933 ADU oraz 1860 ADU dla tensometru T3.

Tab. 5.31. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 3

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Tensometr	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2001	1606	1535
Przejście 2	2009	286	1241	2270	1877	1348	1925	1398	1289	1825	2053	1670	1807	1881	1740
Przejście 3	1872	298	1204	2229	2187	1349	2126	1994	1322	1987	1219	1251	1933	1742	1860

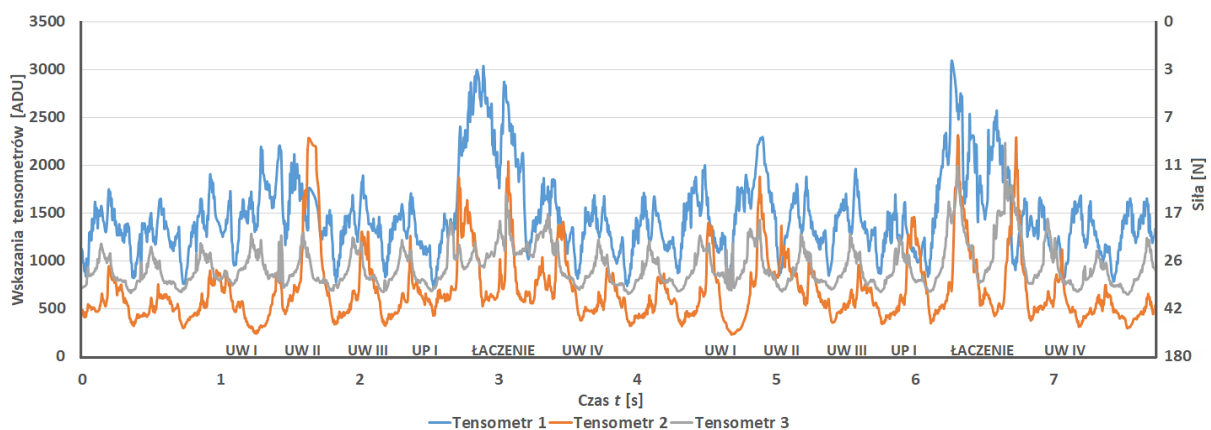


Rys. 5.101. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 10 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.32 oraz zwizualizowane na rysunku 5.102. Wskazania dotyczące uszkodzenia UW I w przejściu 1 występują pomiędzy 1,0-1,4 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 233 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1817 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1278 ADU. Podczas przejścia 2 w przedziale pomiędzy 4,4-4,8 s najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 234 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1995 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1260 ADU. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest identyfikowane pomiędzy 1,5-1,9 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2284 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2207 ADU, a tensometr T3 1290 ADU. Podczas przejścia 2 w przedziale pomiędzy 4,9-5,3 s największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1877 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 2297 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1422 ADU. Uszkodzenie o oznaczeniu UW III jest wykrywalne w czasie przejścia 1 pomiędzy 2,0-2,4 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1300 ADU w przypadku tensometru T2 i 1887 ADU dla tensometru T1 oraz 1239 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań charakterystycznych dla uszkodzenia UW III w przejściu 2 występuje pomiędzy 5,4-5,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1363 ADU, dla tensometru T1 było to 1879 ADU oraz tensometru T3 1274 ADU. Bezpośredni kontakt uszkodzenia UP I z bębniem zwrotnym w pierwszym przejściu występuje pomiędzy 2,5-2,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1258 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1699 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1213 ADU. W drugim przejściu w odpowiednim zakresie pomiędzy 5,8-6,0 s zarejestrowano następujące wartości: dla tensometru T2 1449 ADU, dla T1 1611 ADU, a dla tensometru T3 1246 ADU. W pierwszym przejściu kontakt z bębniem zwrotnym taśmy w miejscu uszkodzenia UW IV występuje w zakresie pomiędzy 3,5-4,0 s. W trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 1405 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 1847 ADU oraz 1486 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 7,0-7,4 s. Największa zmierzona wartość dla tensometru T2 wyniosła 1115 ADU, dla tensometru T1 było to 1661 ADU oraz tensometru T3 1408 ADU.

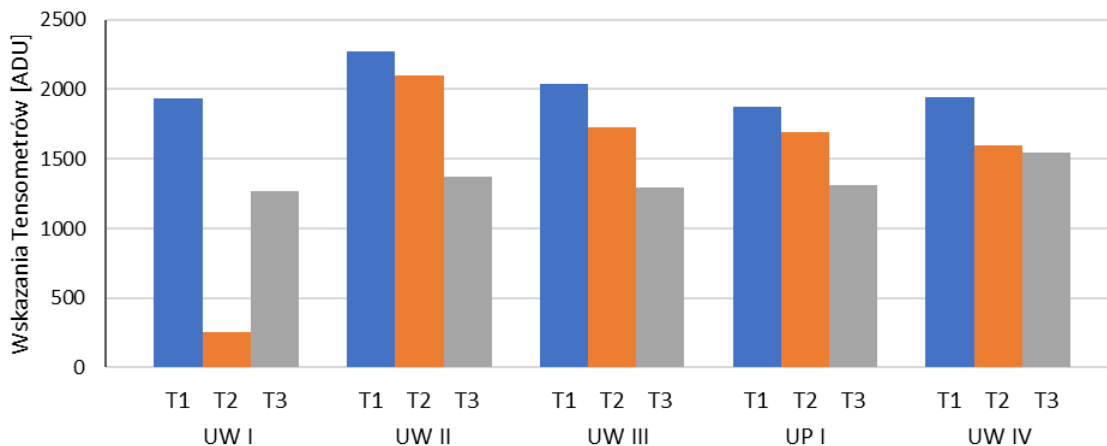
Tab. 5.32. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 10

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1817	233	1278	2207	2284	1290	1887	1300	1239	1699	1258	1213	1847	1405	1486
Przejście 2	1995	224	1260	2297	1877	1422	1879	1363	1274	1611	1449	1246	1661	1115	1408



Rys. 5.102. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

Na rysunku 5.103 znajduje się zestawienie zbiorcze wyników, pozwalające zauważyć charakterystyczne zakłócenia sygnałów, umożliwiające wykrywanie i identyfikowanie uszkodzenia taśmy przenośnikowej.



Rys. 5.103. Zestawienie wskazań tensometrów, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

Podczas pomiarów przy prędkości $n_2 = 318$ obr/min najbardziej asymetryczny rozkład nacisków na tensometry, które wygenerowało uszkodzenie UW I. Tensometr T2 wskazał największy spadek wartości, podobnie jak dla mniejszych prędkości obrotowych odzwierciedlający lokalny wzrost nacisku taśmy, największy wzrost wartości wskazań przypada na T1 również dla T3 jest widoczny wzrost wartości wskazań. Uszkodzenie UW II wygenerowało największe wartości wskazań zarówno dla T1 oraz T2, najbardziej obciążony był T3 dla którego przypada spadek wartości wskazań. Uszkodzenie UW III wygenerowało najmniejsze obciążenie dla T1, oraz schodkowo malejące wskazania od T1 do T3. Uszkodzenie UP I wygenerowało rozkład wartości wskazań o zbliżonym charakterze jak dla uszkodzenia UW II, widoczna jest największa wartość wskazania dla T1 oraz najmniejsza dla T3. Uszkodzenie UW IV wygenerowało rozkład wartości wskazań, w którym zauważalne są największe wartości wskazań dla T1 natomiast T3 wskazał zbliżoną wartość jak dla T2.

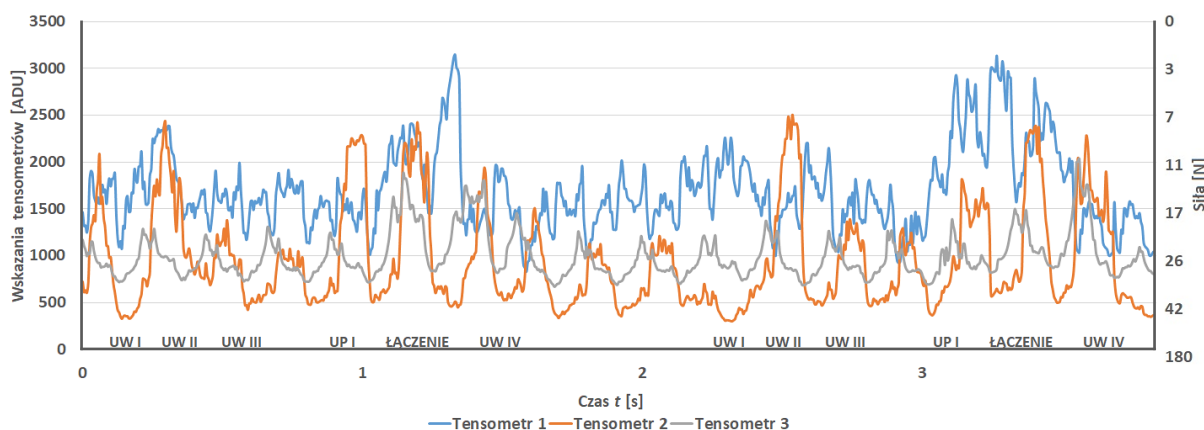
Etap 2, prędkość 540 obr/min

Dla prędkości obrotowej bębna $n_3 = 540$ obr/min w trakcie pomiaru nr 6 otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.33 oraz zwizualizowane na rysunku 5.104. Wskazania, umożliwiające wykrycie uszkodzenia UW I, w przejściu 1 występują pomiędzy 0,0-0,2 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 328 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1871 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1272 ADU. Podczas przejścia 2 w przedziale pomiędzy 2,1-2,3 s najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 301 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 2167 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1216 ADU. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 1 jest wykrywane pomiędzy 0,3-0,5 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2432 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2381 ADU, a tensometr T3 1291 ADU. Podczas przejścia 2 w odpowiednim przedziale pomiędzy 2,4-2,6 s największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2401 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 2197 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1335 ADU. Identyfikacja uszkodzenie o oznaczeniu UW III następuje w czasie przejścia 1 pomiędzy 0,6-0,8 s, wówczas tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1243 ADU w przypadku tensometru T2 i 1991 ADU dla tensometru T1 oraz 1309 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań, pozwalających wykryć uszkodzenie UW III, w przejściu 2 występuje pomiędzy 2,7-2,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1316 ADU, dla tensometru T1 było to 1807 ADU oraz tensometru T3 1269 ADU. Uszkodzenia UP I w przejściu 1 jest identyfikowane w czasie pomiędzy 0,9-1,1 s.

Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2288 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1820 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1260 ADU. W drugim przejściu zarejestrowane największe wartości w zakresie pomiędzy 3,0-3,2 s dla tensometru T2 wyniosła 1781 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2054 ADU, a tensometr T3 1321 ADU. W pierwszym przejściu uszkodzenie UW IV jest wykrywane w zakresie pomiędzy 1,4-1,6 s, a w trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 1941 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 1952 ADU oraz 1801 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,6-3,8 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 2205 ADU, dla tensometru T1 było to 2039 ADU oraz tensometru T3 2038 ADU.

Tab. 5.33. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 6

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1871	328	1272	2381	2432	1291	1991	1243	1309	1820	2288	1260	1952	1941	1801
Przejście 2	2167	301	1216	2197	2401	1335	1807	1316	1269	2054	1781	1321	2039	2205	2038



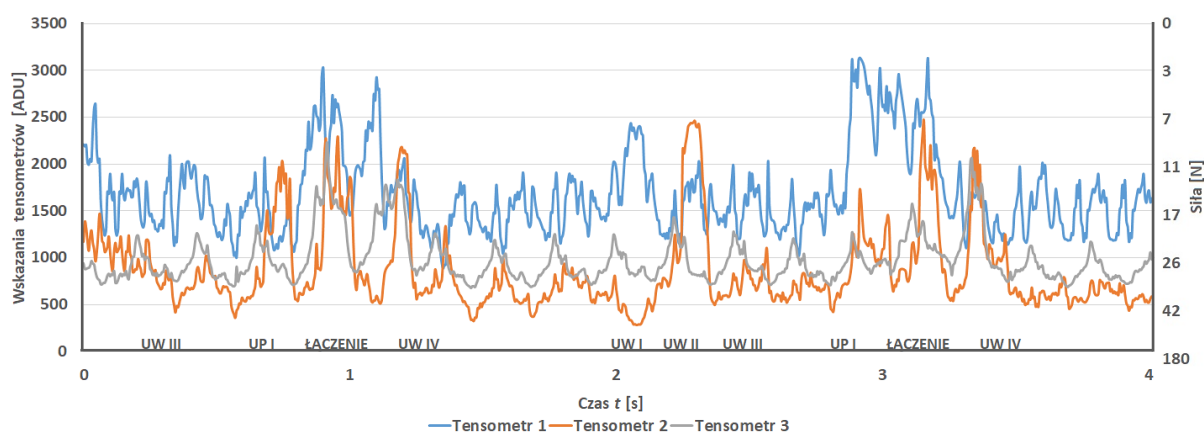
Rys. 5.104. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 7 przy prędkości obrotowej $n_3 = 540$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.34 oraz zwizualizowane na rysunku 5.105. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW I w przejściu 2 występują pomiędzy 1,9-2,1 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 287 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 2023 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1226 ADU. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 2 jest identyfikowane pomiędzy 2,2-2,4 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2466 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2436 ADU, a tensometr T3 1396 ADU. Uszkodzenie o oznaczeniu UW III jest identyfikowane podczas przejścia 1 pomiędzy 0,1-0,3 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1243 ADU w przypadku tensometru T2 i 1897 ADU dla tensometru T1 oraz 1235 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań, odpowiadających uszkodzeniu UW III, w przejściu 2 obejmuje przedział 2,2-2,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1109 ADU, dla tensometru T1 było to 1911 ADU oraz tensometru T3 1234 ADU. Odpowiednie wskazania, pozwalające wykryć uszkodzenie UP I, w przejściu 1 występują pomiędzy 0,4-0,6 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2029 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 2068 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1348 ADU. W drugim przejściu odpowiedni zakres przypadł na 2,5-2,7 s, dla tensometru T2 wskazania wyniosły 1715 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1938 ADU, a tensometr T3 1226 ADU. W pierwszym przejściu uszkodzenie UW IV jest identyfikowane

w zakresie pomiędzy 1,2-1,4 s, a w trakcie tego odczytu uzyskano największe wartość 2186 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 2057 ADU oraz 1836 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu nr 2 występuje pomiędzy 3,4-3,6 s. Największa zmierzona wartość dla tensometru T2 wyniosła 2176 ADU, dla tensometru T1 było to 2207 ADU oraz tensometru T3 2035 ADU.

Tab. 5.34. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 7

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
Tensometr	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	1897	1243	1235	2068	2029	1348	2057	2186	1836
Przejście 2	2023	287	1226	2436	2466	1396	1911	1109	1234	1938	1715	1226	2027	2176	2035



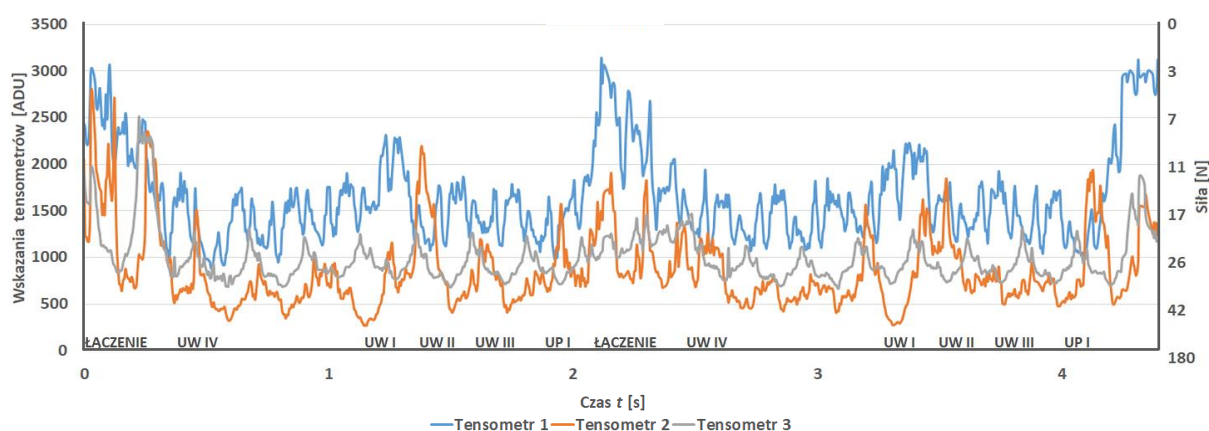
Rys. 5.105. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 10 przy prędkości obrotowej $n_3 = 540$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.35 oraz zwizualizowane na rysunku 5.106. Wskazania dla uszkodzenia UW I w przejściu 2 występują pomiędzy 1,0-1,2 s. Najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 270 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1970 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1235 ADU. Odpowiedni zakres wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 3,1-3,3 s. W tym czasie najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 275 ADU, dla tensometru T1 było to 1808 ADU oraz tensometru T3 1209 ADU. Na wykresie przebieg sygnału tensometru T2 charakteryzuje się w tym miejscu widocznym zagłębieniem. Uszkodzenie oznaczone jako UW II w przypadku przejścia 2 jest identyfikowane pomiędzy 1,3-1,5 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2196 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 2312 ADU, a tensometr T3 1298 ADU. Zakres odpowiednich wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 3,4-3,6 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1850 ADU, dla tensometru T1 było to 2230 ADU oraz tensometru T3 1300 ADU. W przypadku uszkodzenia UW III zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 2 znalazł się pomiędzy 1,6-1,8 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1186 ADU w przypadku tensometru T2 i 1864 ADU dla tensometru T1 oraz 1258 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie UW III w przejściu 3 występuje pomiędzy 3,7-3,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 956 ADU, dla tensometru T1 było to 1926 ADU oraz tensometru T3 1323 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie UP I w przejściu 2 występuje pomiędzy 1,9-2,1 s, największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1576 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1823 ADU oraz tensometr T3 wskazał 1233 ADU. W przejściu 3 zarejestrowano największe wartości w zakresie pomiędzy 4,0-4,2 s, dla tensometru T2 było to 1940 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1771 ADU, a tensometr T3 1287 ADU. W pierwszym przejściu zakres wskazań odpowiadających

uszkodzeniu UW IV występuje pomiędzy 0,3-0,5 s, a w trakcie tego odczytu uzyskano największe wartości 1511 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 1910 ADU oraz 1275 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań dla uszkodzenia UW IV w przejściu nr 2 obejmuje odcinek 2,4-2,6 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 1372 ADU, dla tensometru T1 było to 1944 ADU oraz tensometru T3 1469 ADU.

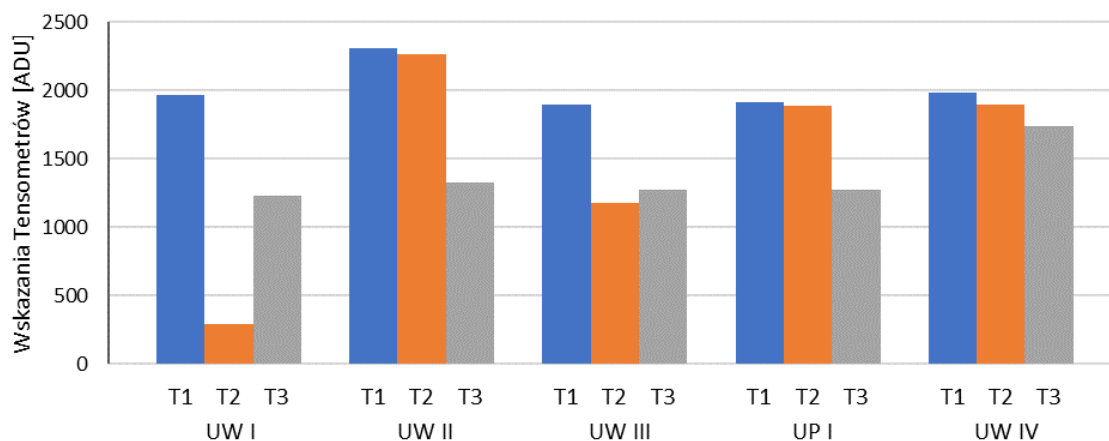
Tab. 5.35. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 10

Typ uszkodzenia	UW I			UW II			UW III			UP I			UW IV		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1910	1511	1275
Przejście 2	1970	270	1253	2312	2196	1298	1864	1186	1258	1823	1576	1233	1944	1372	1469
Przejście 3	1808	275	1209	2230	1850	1300	1926	956	1323	1771	1940	1287	-	-	-



Rys. 5.106. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Na podstawie wszystkich powyżej zaprezentowanych wykresów i odpowiednich danych, umieszczonych w tabelach, można określić miejsce występowania danego typu uszkodzenia oraz odpowiadającą mu kombinację wskazań trzech tensometrów. Rysunek 5.107 przedstawia ostatnie zestawienie dla drugiego etapu pomiarów przy prędkości $n_3 = 540$ obr/min.



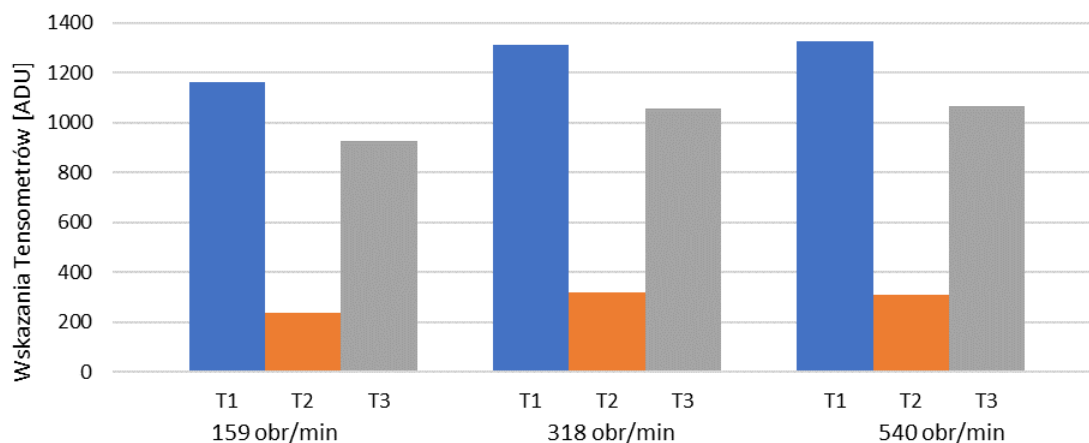
Rys. 5.107. Zestawienie wskazań tensometrów, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Uszkodzenie UW I wygenerowało zróżnicowany rozkład nacisków na tensometry. Tensometr T2 wskazał największy spadek wartości tj. lokalny wzrost nacisku taśmy, podobnie jak dla mniejszych prędkości obrotowych, największy wzrost wartości wskazań przypada na T1 również dla T2 jest

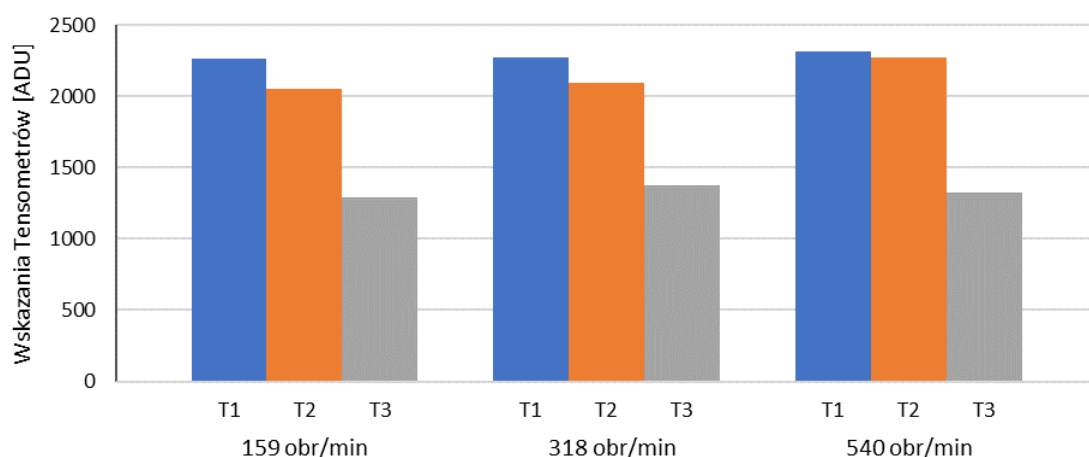
widoczny wzrost wartości wskazań. Uszkodzenie UW II wygenerowało największe wartości wskazań dla tensometrów T1 oraz T2, najbardziej obciążonym był T3 dla którego przypadku spadek wartości wskazań. Uszkodzenie UW III wygenerowało największe wskazania dla T1, oraz dla T3, najbardziej obciążonym tensometrem był T2. Uszkodzenie UP I wygenerowało rozkład wartości wskazań, w którym T1 oraz T3 mają zbliżone wartości wskazań. Najbardziej obciążonym był tensometr T3, dla którego przypadku najmniejsza wartość wskazań. Uszkodzenie UW IV ma schodkowy rozkład wartości, w którym największa przypada na T1, a najmniejsza na T3.

Podsumowanie Etapu 2

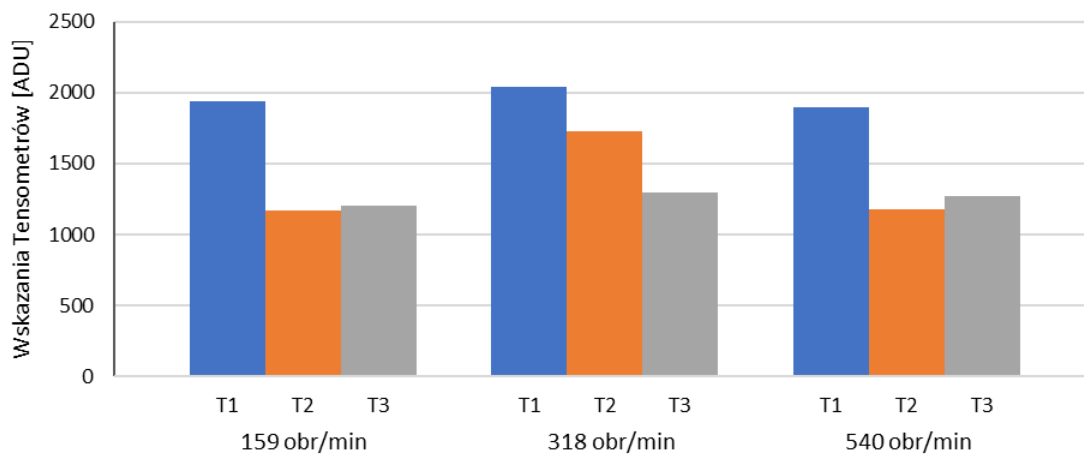
Wpływ prędkości na charakterystyczne wartości wskazań tensometrów jest widoczny na wykresach zbiorczych na rysunkach 5.108 - 5.112, odpowiednio dla uszkodzeń UW I, UW II, UW III, UW IV i UP I. Uszkodzenia generują wzrost wartości wskazań, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Wzrost jest szczególnie widoczny dla prędkości w zakresie pomiędzy 159 - 318 obr/min dla uszkodzeń wzdłużnych (UW). Uszkodzenie UW I wygenerowało inny rozkład nacisków na tensometry niż pozostałe cztery, tensometr środkowy jest znacznie bardziej obciążony. Rozkład nacisków generowany przez UW II przy prędkości 540 obr/min wykazuje podobny charakter wskazań jak dla uszkodzeń UW IV oraz UP 1.



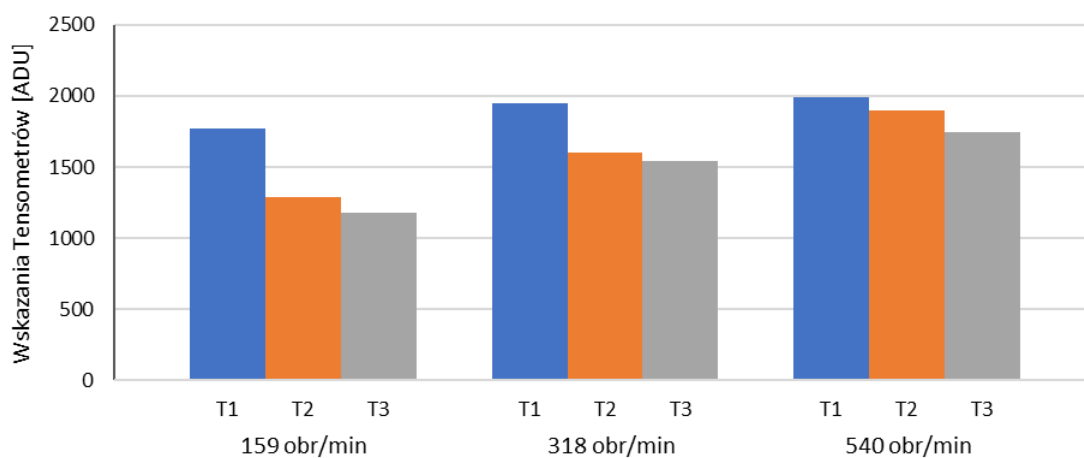
Rys. 5.108. Zestawienie wskazań tensometrów, uszkodzenie UW I (oprac. własne)



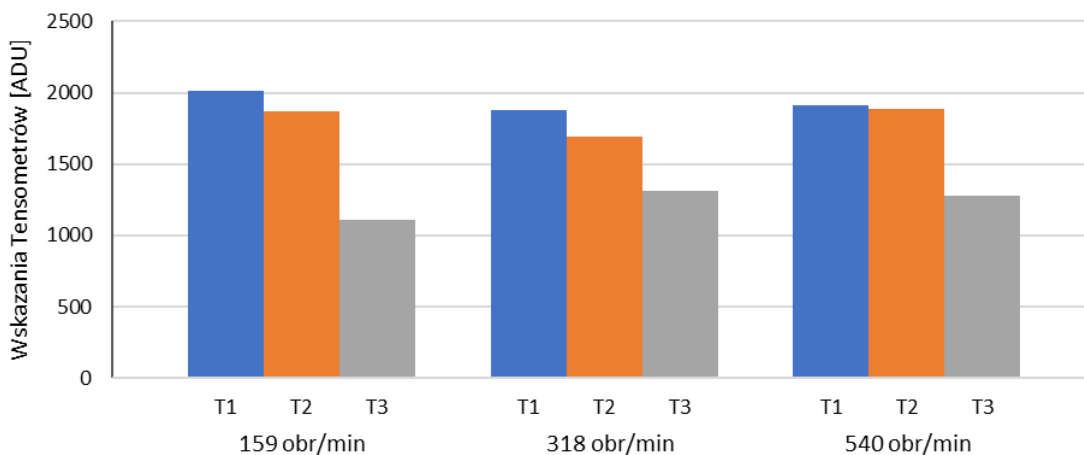
Rys. 5.109. Zestawienie wskazań tensometrów, uszkodzenie UW II (oprac. własne)



Rys. 5.110. Zestawienie wskazań tensometrów, uszkodzenie UW III (oprac. własne)



Rys. 5.111. Zestawienie wskazań tensometrów, uszkodzenie UW IV (oprac. własne)

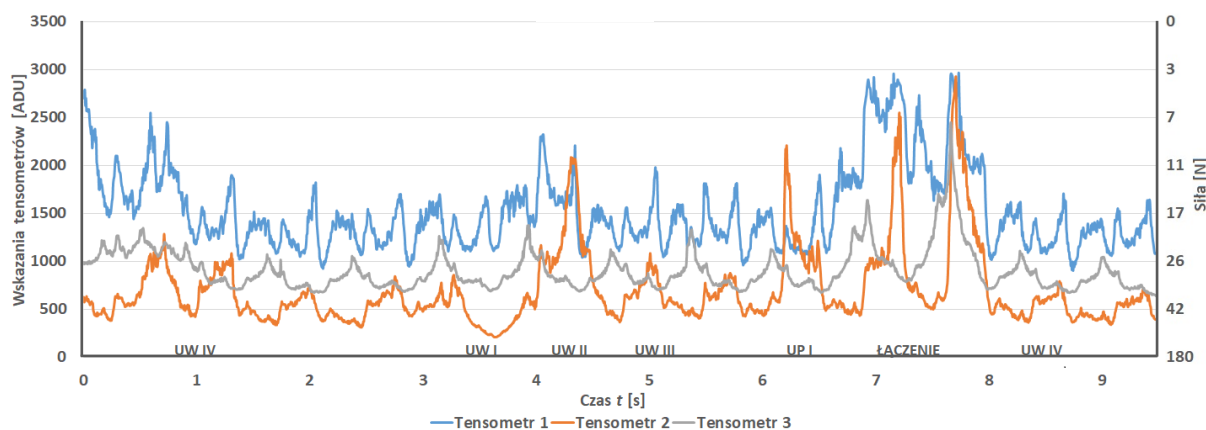


Rys. 5.112. Zestawienie wskazań tensometrów, uszkodzenie UP I (oprac. własne)

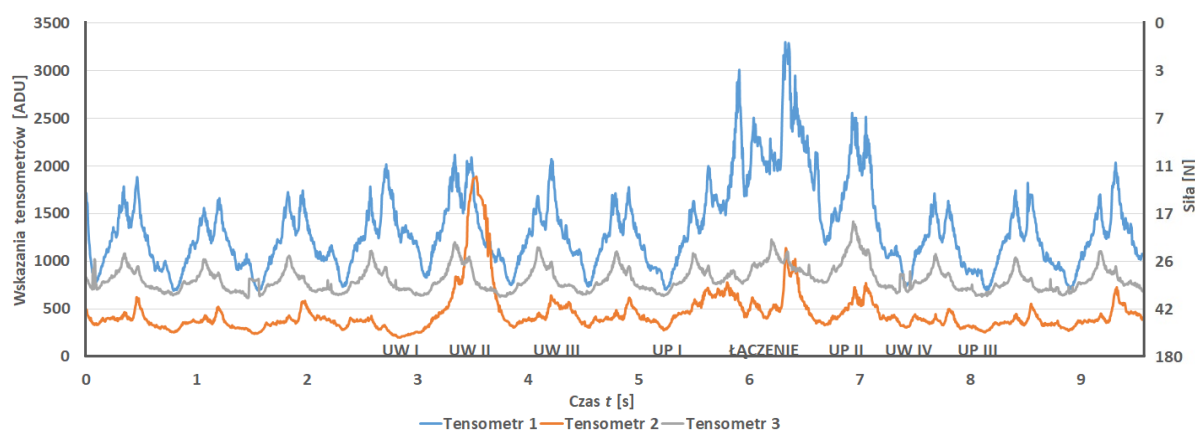
Podsumowując wyniki drugiego etapu badań z uszkodzeniami taśmy, można stwierdzić, że tezy pomocnicze zostały udowodnione. Niemniej jednak, w celu zebrania większej liczby danych, przeprowadzono kolejny, trzeci etap badań.

Etap 3, prędkość 159 obr/min

Poniżej przedstawiono dwa przykładowe przebiegi monitorowania pracy taśmy, zawierającej odpowiednio 5 uszkodzeń przy prędkości $n_l = 159$ obr/min (rys. 5.113) oraz 7 uszkodzeń przy tej samej prędkości (rys. 5.114). Jak pokazano wcześniej na schemacie na rys. 5.76, dodatkowe dwa uszkodzenia zostały wykonane na jednej z krawędzi taśmy w pobliżu tensometru T1.



Rys. 5.113. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



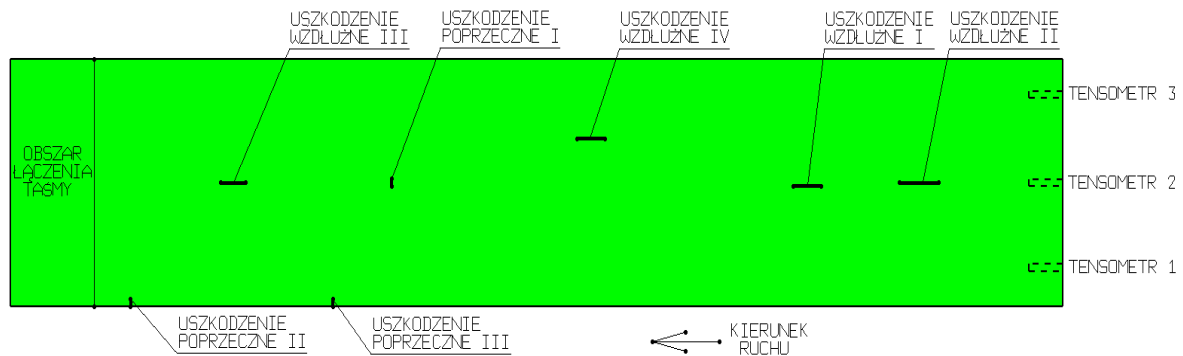
Rys. 5.114. Wskazania tensometrów, 7 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

Dwa poprzeczne nacięcia krawędzi taśmy od strony tensometru T1 spowodowały wzrost amplitudy wartości oraz zmniejszenie naciągu taśmy. Zauważalne są inne wskazania, charakterystyczne dla uszkodzeń wykonanych na środkowej części taśmy. W warunkach pracy przenośnika taśma zaczęła zbiegać unieruchamiając przenośnik, co jest skrajnym przypadkiem uszkodzenia.

Omówione wyniki badań w pełni udowadniają postawione tezy pomocnicze, a tym samym dowodzą słuszności tezy głównej. W celu zebrania dodatkowych danych, pozwalających na uogólnienie, wykonano serię pomiarów dla drugiej taśmy tego samego typu.

Taśma nr 2

Uszkodzenia wykrywane przez tensometryczny układ pomiarowy dla badanej taśmy nr 2 zostały przedstawione na rys. 5.115, podobnie jak dla taśmy przenośnikowej nr 1. Badania przeprowadzono w dwóch etapach, w pierwszym wykonano pięć uszkodzeń: UW I, UW II, UW III, UW IV, UP I. Wykonano 150 pomiarów dla trzech prędkości, $n_1 = 159$ obr/min, $n_2 = 318$ obr/min oraz $n_3 = 540$ obr/min. Podczas pojedynczego pomiaru występował co najmniej dwa razy kontakt taśmy w miejscu uszkodzenia z bębnum zwrotnym. W drugim etapie wykonano kolejne dwa uszkodzenia oznaczone jako UP II i UP III oraz wykonano pomiar przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min, uzyskując kolejne 5 charakterystyk. Kształt i rozmieszczenie uszkodzeń ukazano na rys. 5.115, który w pomniejszonej skali modelu rzeczywistego bezpośrednio odpowiada wymiarom całej rozwiniętej taśmy oraz długości i pozycji zadanych uszkodzeń.



Rys. 5.115. Schemat uszkodzeń taśmy nr 2 (oprac. własne)

Tabela 5.36 zawiera opis zadanych uszkodzeń, z których jedno obejmowały całą grubość badanej taśmy t_s , a inne tylko część, bez całkowitego przecięcia.

Tab. 5.36. Opis uszkodzeń taśmy nr 2

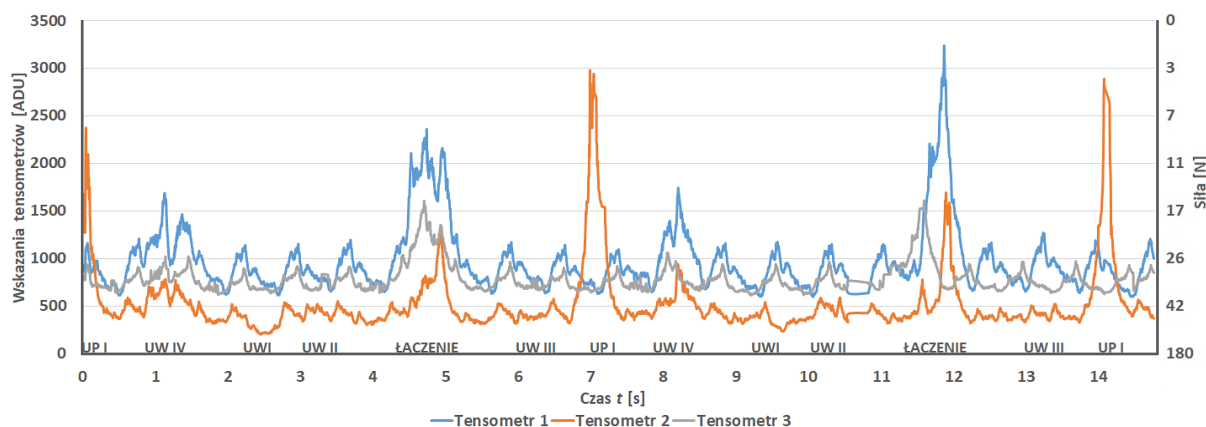
Rodzaj uszkodzenia	Oznaczenie	Opis
Uszkodzenie wzdłużne I	UW I	Przecięcie wzdłużne taśmy o długości 50 mm, 170 mm od brzegu (przesunięcie w kierunku tensometru T1 o 5 mm) 1180 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie wzdłużne II	UW II	Przecięcie wzdłużne taśmy o długości 70 mm, 175 mm od brzegu (w środkowej części taśmy) 1370 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie wzdłużne III	UW III	Nacięcie wzdłużne o długości 45 mm i głębokości 1 mm, 175 mm od brzegu (w osi tensometru T2) 225 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie wzdłużne IV	UW IV	Nacięcie wzdłużne o długości 50 mm i głębokości 1,5 mm, 115 mm od brzegu (w połowie odległości tensometrów T2 i T3) 860 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie poprzeczne I	UP I	Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, 170 mm do 180 mm od brzegu (w osi tensometru T2) 530 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie poprzeczne II	UP II	Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, 0 mm do 10 mm od brzegu (od strony tensometru T1) 65 mm od obszaru łączenia
Uszkodzenie poprzeczne III	UP III	Przecięcie poprzeczne o długości 10 mm, 0 mm do 10 mm od brzegu (od strony tensometru T1) 425 mm od obszaru łączenia
Obszar łączenia taśmy	ŁĄCZENIE	Obszar łączenia końców taśmy przenośnikowej identyfikowany przez układ pomiarowy nie będący jej uszkodzeniem

Etap 1, prędkość 159 obr/min

Dla pomiaru numer 7 z serii 10 wykonanych przy prędkości obrotowej $n_1 = 159$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.37 oraz zwiualizowano na rysunku 5.116. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 2 występują pomiędzy 6,0-6,5 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 533 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1172 ADU oraz tensometr T3 wskazał 963 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 13,0-13,5 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 529 ADU, dla tensometru T1 było to 1273 ADU oraz tensometru T3 965 ADU. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 0,0-0,5 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2922 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1163 ADU, a tensometr T3 936 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 6,6-7,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2976 ADU, dla tensometru T1 było to 1094 ADU oraz tensometru T3 919 ADU. W przejściu 3 zarejestrowano największe wartości wskazań identyfikujących uszkodzenie w zakresie pomiędzy 13,8-14,5 s dla tensometru T2 było to 2889 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1192 ADU, a tensometr T3 970 ADU. Zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu UW IV pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,6-1,5 s, tensometry wskazały wtedy największe wartości odpowiednio 782 ADU w przypadku tensometru T2 i 1689 ADU dla tensometru T1 oraz 1019 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 7,5-8,6 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 947 ADU, dla tensometru T1 było to 1745 ADU oraz tensometru T3 1057 ADU. Zakres wskazań obejmujących uszkodzenie UW I w przejściu 1 występują pomiędzy 2,1-2,8 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 207 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1140 ADU oraz tensometr T3 wskazał 897 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 9,1-9,8 s dla tensometru T2 wyniosła 241 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1176 ADU, a tensometr T3 940 ADU. W pierwszym przejściu zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu UW II występuje w zakresie pomiędzy 2,9-3,7 s w trakcie tego pomiaru uzyskano największą wartość 545 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 1155 ADU oraz 912 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 10,0-10,8 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 552 ADU, dla tensometru T1 było to 1154 ADU oraz tensometru T3 966 ADU.

Tab. 5.37. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 7

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	1163	2922	936	1689	782	1019	1140	207	897	1155	545	912
Przejście 2	1172	533	963	1094	2976	919	1745	947	1057	1176	241	940	1154	552	966
Przejście 3	1273	529	965	1192	2889	970	-	-	-	-	-	-	-	-	-

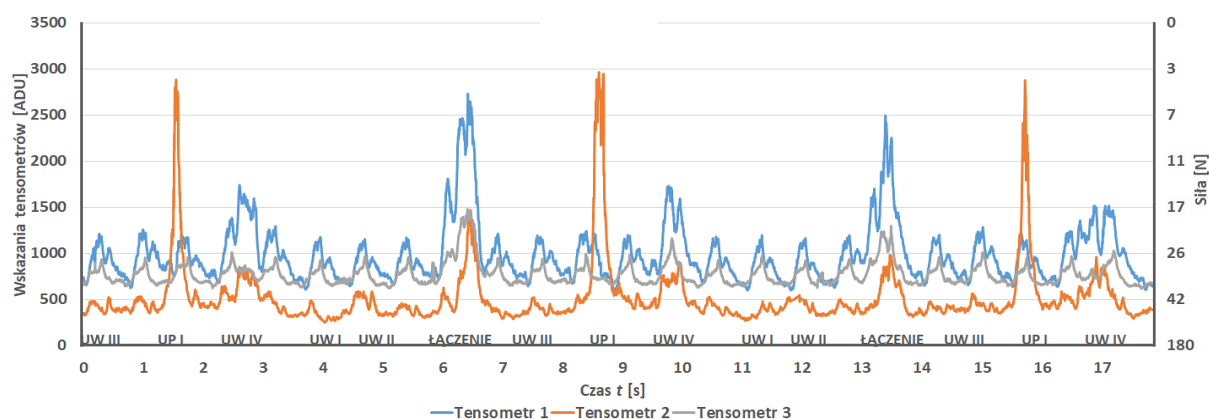


Rys. 5.116. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)

Podczas pomiaru nr 8 przy prędkości obrotowej $n_1 = 159$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.38 oraz zwizualizowane na rysunku 5.117. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 1 występują pomiędzy 0,0-0,6 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 533 ADU, tensometr T1 wskazał 1156 ADU oraz tensometr T3 953 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 2 występuje pomiędzy 7,0-7,6 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 517 ADU, tensometru T1 było to 1192 ADU oraz tensometru T3 939 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 14,3-14,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 557 ADU, tensometru T1 1284 ADU oraz tensometru T3 1009 ADU. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 1,1-1,8 s, tensometr T2 wskazał wtedy 2884 ADU, tensometr T1 wskazał 1205 ADU, a tensometr T3 954 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 8,1-8,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2964 ADU, tensometru T1 1240 ADU oraz tensometru T3 992 ADU. Zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu w przejściu 3 znajduje się pomiędzy 15,3-16,1 s, tensometr T2 wskazał 2470 ADU, tensometr T1 wskazał 1216 ADU, a tensometr T3 947 ADU. Zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu UW IV pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 2,2-2,9 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 838 ADU w przypadku tensometru T2 i 1740 ADU dla tensometru T1 oraz 1012 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 9,4-10,3 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 896 ADU, tensometru T1 1731 ADU oraz tensometru T3 1161 ADU. Zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu w przejściu 3 występuje pomiędzy 16,5-17,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 957 ADU, tensometru T1 wskazał 1511 ADU, a tensometru T3 1022 ADU. W przypadku uszkodzenia UW I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 3,7-4,4 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 249 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1174 ADU, tensometr T3 wskazał 924 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości wskazań identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 10,4-11,2 s dla tensometru T2 wyniosła 269 ADU, tensometr T1 wskazał 1196 ADU, tensometr T3 970 ADU. W przypadku uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 4,6-5,4 s w trakcie tego odczytu uzyskano największe wartości odpowiednia 585 ADU z tensometru T2, 1152 ADU z tensometru T1 oraz 958 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 11,5-12,2 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 545 ADU, dla tensometru T1 było to 1164 ADU oraz tensometru T3 922 ADU.

Tab. 5.38. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 8

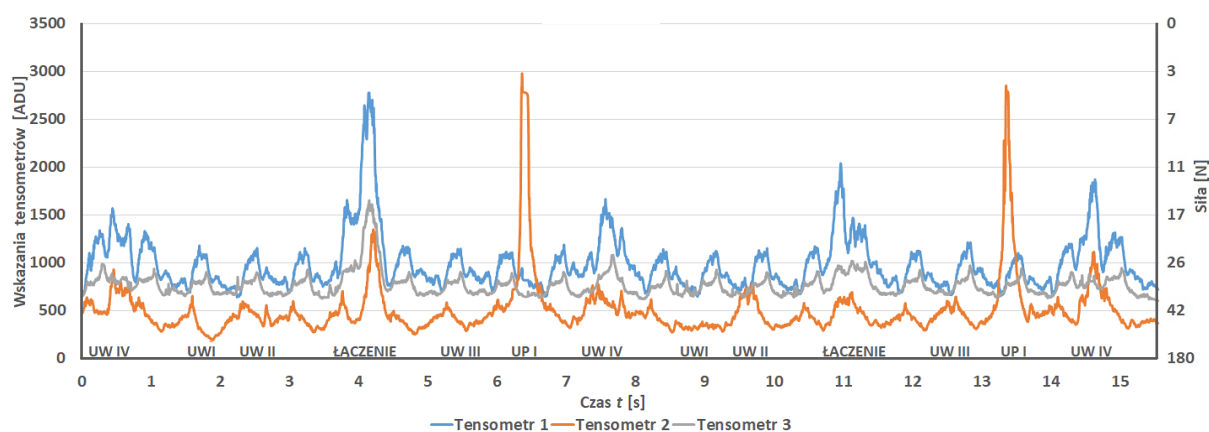
Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1256	533	953	1205	2884	954	1740	838	1012	1174	249	924	1152	585	958
Przejście 2	1192	517	939	1240	2964	992	1731	896	1161	1196	269	970	1164	545	922
Przejście 3	1284	557	1009	1216	2470	947	1511	957	1022	-	-	-	-	-	-

**Rys. 5.117.** Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 10 przy prędkości obrotowej $n_l = 159$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.39 oraz zwizualizowane na rysunku 5.118. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 2 występują pomiędzy 5,1-5,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 584 ADU, dla tensometru T1 było to 1149 ADU oraz tensometru T3 916 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 12,2-12,8 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 644 ADU, tensometru T1 1215 ADU oraz tensometru T3 976 ADU. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 2 znalazł się pomiędzy 6,0-6,8 s. Wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2978 ADU, tensometru T1 1117 ADU oraz tensometru T3 896 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 12,1-12,9 s, dla tensometru T2 było to 2646 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1103 ADU, a tensometr T3 942 ADU. Zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu UW IV pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,1-0,8 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 928 ADU w przypadku tensometru T2 i 1572 ADU dla tensometru T1 oraz 985 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 7,2-7,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 771 ADU, tensometru T1 1668 ADU oraz tensometru T3 1085 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 14,2-14,9 s, największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 948 ADU, tensometru T1 1873 ADU, tensometru T3 1113 ADU. Uszkodzenie UW I w przejściu 2 występuję pomiędzy 1,4-2,1 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 191 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1182 ADU, tensometr T3 wskazał 906 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 8,5-9,1 s dla tensometru T2 najmniejsza wartość wyniosła 272 ADU, tensometr T1 wskazał 1120 ADU, tensometr T3 931 ADU. W przypadku uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 2,3-2,9 s w trakcie tego odczytu uzyskano największą wartość 592 ADU z tensometru T2 oraz z tensometru T1 1156 ADU oraz 903 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 9,3-9,9 s. Zmierzona największa wartość dla T2 wyniosła 771 ADU, dla T1 było to 1154 ADU oraz 904 ADU dla T3.

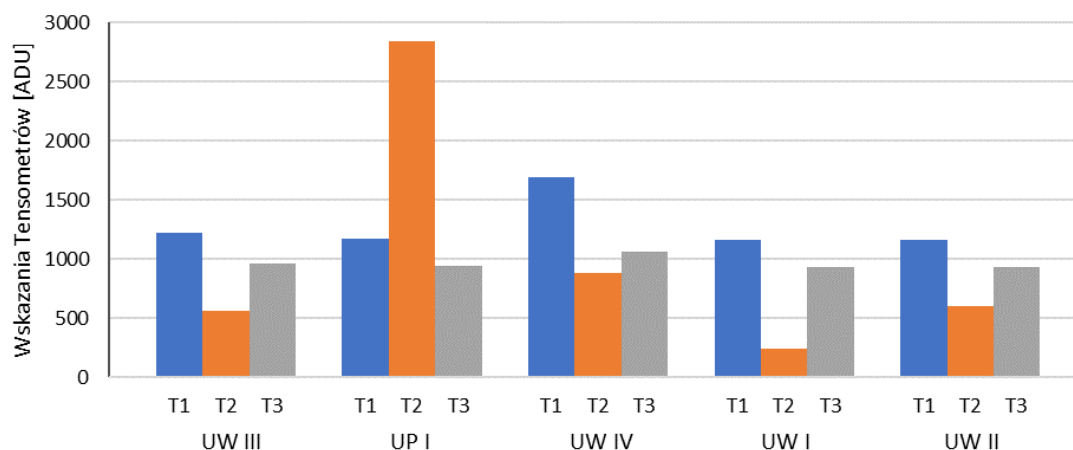
Tab. 5.39. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 10

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	1572	928	985	1182	191	906	1156	592	903
Przejście 2	1149	584	916	1117	2978	896	1668	771	1085	1120	272	931	1154	771	904
Przejście 3	1215	644	976	1103	2646	942	1873	948	1113	-	-	-	-	-	-



Rys. 5.118. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)

Z zestawienia zbiorczego na rysunku 5.119 można zaobserwować charakterystyczne, powtarzalne i identyfikowalne zakłócenia sygnałów, bezpośrednio powiązanych z uszkodzeniami taśmy przenośnikowej. Podczas pomiarów przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min uszkodzenie UW III wygenerowało rozkład nacisków, w którym tensometr T2 wskazał największy spadek wartości. W tym czasie zewnętrzne tensometry T1 i T3 wskazały większe wartości, a największa odpowiada T1.



Rys. 5.119. Zestawienie wskazań tensometrów, prędkość $n_1 = 159$ obr/min (oprac. własne)

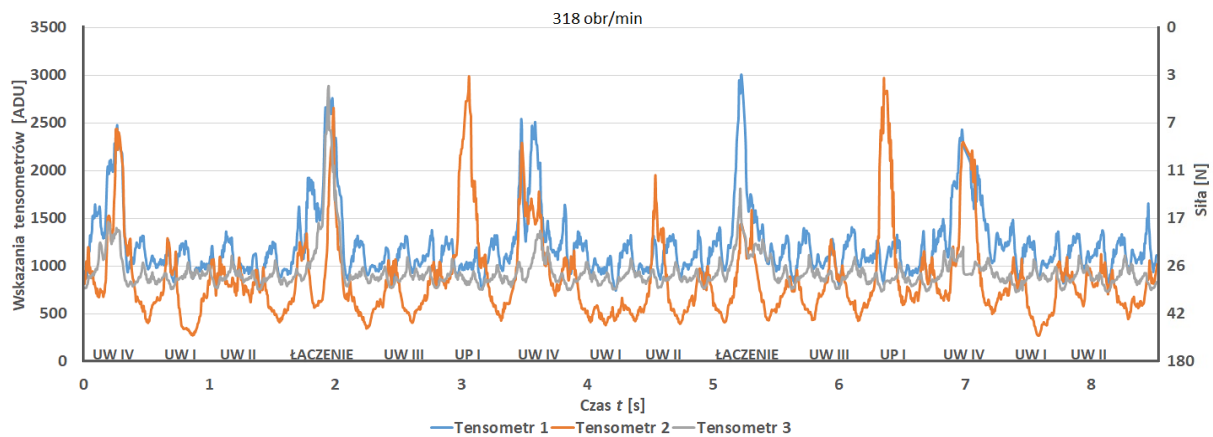
Uszkodzenie UP I wygenerowało najbardziej asymetryczny rozkład wartości wskazań największa wartość znacznie odbiegająca od pozostałych przypada na T2, tensometr T1 wskazał drugą z kolei największą wartość wskazań, na T3 przypada najmniejsza wartość. Uszkodzenie UW IV wygenerowało rozkład wartości wskazań, w którym największa przypada na T1, natomiast największy nacisk taśmy przypada na tensometr T2. Uszkodzenie UW I wygenerowało rozkład wskazań, w którym najbardziej obciążonym był T2. Pozostałe tensometry wskazały większe wartości, największe przypada na T1. Uszkodzenie UW II wygenerowało największą wartość wskazania dla T1, najmniejsza wartość wskazań przypada na T2.

Etap 1, prędkość 318 obr/min

Podczas pomiaru nr 3 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.40 oraz zwizualizowane na rysunku 5.120. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 2 występują pomiędzy 2,2-2,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1069 ADU, dla tensometru T1 było to 1378 ADU oraz tensometru T3 1096 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 5,6-6,1 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1278 ADU, tensometru T1 1408 ADU oraz tensometru T3 1098 ADU. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 2 znalazł się pomiędzy 2,8-3,2 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2988 ADU, tensometru T1 1129 ADU oraz tensometru T3 1079 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 6,2-6,7 s, największa wartość wskazania dla tensometru T2 to 2801 ADU natomiast tensometr T1 wskazał 1327 ADU, a tensometr T3 1041 ADU. Zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu UW IV pojawia się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,0-0,5 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 2436 ADU w przypadku tensometru T2 i 2481 ADU dla tensometru T1 oraz 1468 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,3-3,8 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2292 ADU, tensometru T1 2513 ADU oraz tensometru T3 1375 ADU. Zakres wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 6,8-7,3 s, największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2301 ADU, tensometru T1 2433 ADU, tensometru T3 1200 ADU. Uszkodzenie UW I w przejściu 1 występuję pomiędzy 0,6-1,0 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 271 ADU, tensometr T1 wskazał 1263 ADU, tensometr T3 wskazał 1044 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 3,9-4,3 s dla tensometru T2 wyniosła 379 ADU, tensometr T1 wskazał 1325 ADU, tensometr T3 1083 ADU. W przejściu 3 zarejestrowano wartości w zakresie pomiędzy 7,4-7,8 s, najmniejsza wartość wskazania dla tensometru T2 wyniosła 269 ADU, tensometr T1 wskazał 1314 ADU, a tensometr T3 1074 ADU. W przypadku uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 1,1-1,6 s w trakcie tego pomiaru uzyskano największą wartość wskazania 1094 ADU z tensometru T2, 1362 ADU z tensometru T1 oraz 1113 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 4,4-4,8 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 1703 ADU, dla tensometru T1 było to 1334 ADU oraz tensometru T3 1046 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 7,9-8,3 s największa wartość wskazania dla tensometru T2 wyniosła 1124 ADU, tensometr T1 wskazał 1375ADU, tensometr T3 1114 ADU.

Tab. 5.40. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 3

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	2481	2436	1468	1263	271	1044	1362	1094	1113
Przejście 2	1378	1069	1096	1129	2988	1079	2513	2292	1375	1325	379	1083	1334	1703	1046
Przejście 3	1408	1278	1098	1327	2801	1041	2433	2301	1200	1314	269	1074	1375	1124	1114

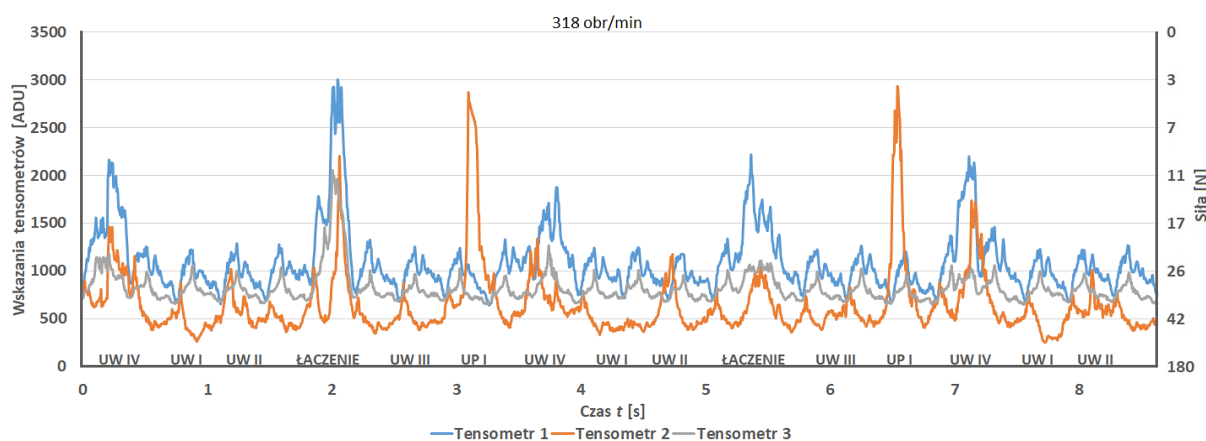


Rys. 5.120. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 6 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.41 oraz zwizualizowane na rysunku 5.121. Zakres wskazań odpowiadających uszkodzeniu UW III w przejściu 2 występuje pomiędzy 2,2-2,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 883 ADU, dla tensometru T1 było to 1255 ADU oraz tensometru T3 974 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 5,7-6,2 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 805 ADU, dla tensometru T1 było to 1265 ADU oraz tensometru T3 1028 ADU. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 2 znalazł się pomiędzy 2,9-3,3 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2772 ADU, dla tensometru T1 było to 1206 ADU oraz tensometru T3 1029 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 6,3-6,7 s dla tensometru T2 największa wartość wyniosła 2897 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1216 ADU, a tensometr T3 965 ADU. Wskazania UW IV pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,1-0,5 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1419 ADU w przypadku tensometru T2 i 2165 ADU dla tensometru T1 oraz 1183 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,3-3,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1340 ADU, tensometru T1 1878 ADU oraz 1270 ADU dla tensometru T3. W przejściu 3 zarejestrowano największe wartości wskazań identyfikujących uszkodzenie w zakresie pomiędzy 6,9-7,3 s, wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1741 ADU, tensometru T1 2199 ADU, oraz 1064 ADU dla tensometru T3. Uszkodzenie UW I w przejściu 1 występuje pomiędzy 0,7-1,0 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 266 ADU, tensometr T1 wskazał 1225 ADU, tensometr T3 wskazał 1059 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 4.1-4,4 s dla tensometru T2 najmniejsza wartość wskazania wyniosła 338 ADU, tensometr T1 wskazał 1243 ADU, a tensometr T3 1015 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 7,5-7,8 s dla tensometru T2 najmniejsza wartość wyniosła 259 ADU, tensometr T1 wskazał 1230 ADU, natomiast tensometr T3 1002 ADU. W przypadku uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 1,1-1,6 s w trakcie tego pomiaru uzyskano największą wartość wskazania 1022 ADU z tensometru T2 z tensometru T1 1290 ADU oraz 1004 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 4,5-5,0 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 1173 ADU, dla tensometru T1 było to 1247 ADU oraz 1014 ADU dla tensometru T3. W przejściu 3 zarejestrowane największe wartości w zakresie 7,9-8,4 s dla tensometru T2 było to 1013 ADU, tensometr T1 wskazał 1222 ADU, natomiast tensometr T3 977 ADU.

Tab. 5.41. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 6

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	2165	1419	1183	1225	266	1059	1290	1022	1004
Przejście 2	1255	883	974	1206	2772	1029	1878	1340	1270	1243	338	1015	1247	1173	1014
Przejście 3	1265	805	1028	1216	2897	965	2199	1741	1064	1230	259	1002	1222	1013	977



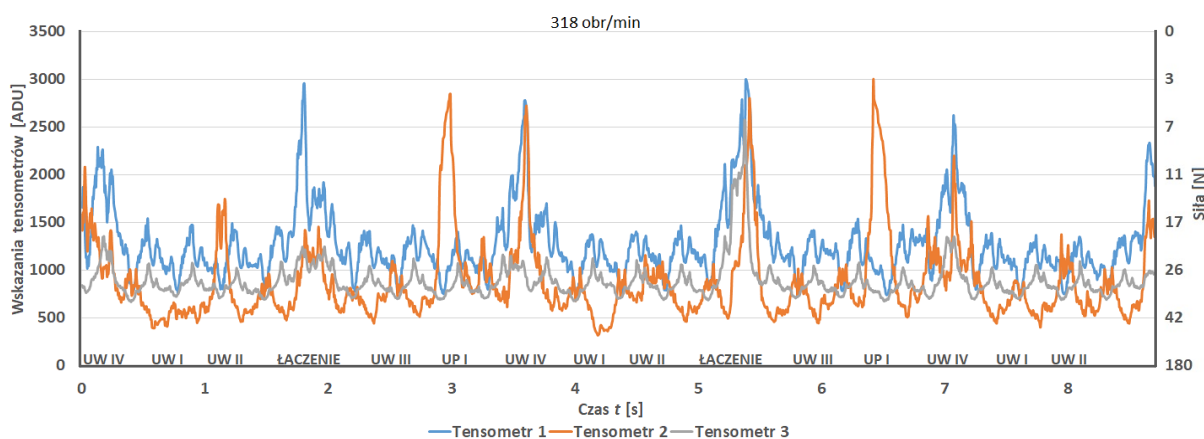
Rys. 5.121. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

Podczas pomiaru nr 10 przy prędkości obrotowej $n_2 = 318$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.42 oraz zwizualizowane na rysunku 5.122. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 2 występują pomiędzy 2,2-2,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1097 ADU, dla tensometru T1 było to 1469 ADU oraz 1121 ADU dla tensometru T3. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 5,7-6,2 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 850 ADU, 1413 ADU dla tensometru T1 oraz 1045 ADU dla tensometru T3. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 2 znalazł się pomiędzy 2,9-3,3 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2848 ADU, dla tensometru T1 było to 1374 ADU oraz 1073 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 6,3-6,7 s, dla tensometru T2 największa wartość wyniosła 2797 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1390 ADU, a tensometr T3 1080 ADU. Wskazania UW IV pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,1-0,5 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1933 ADU w przypadku tensometru T2 i 2290 ADU dla tensometru T1 oraz 1356 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,3-3,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2723 ADU, 2782 ADU dla tensometru T1 oraz 1163 ADU w przypadku tensometru T3. W przejściu 3 zarejestrowano największe wartości wskazań identyfikujących uszkodzenie w zakresie pomiędzy 6,9-7,3 s, największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2195 ADU, dla tensometru T1 było to 2620 ADU, a tensometru T3 1353 ADU. Uszkodzenie UW I w przejściu 1 występuje pomiędzy 0,7-1,0 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 391 ADU, tensometr T1 wskazał największą wartość 1473 ADU, natomiast tensometr T3 wskazał 1076 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 4,0-4,3 s najmniejsza wartość dla tensometru T2 wyniosła 316 ADU, tensometr T1 wskazał największą wartość 1372 ADU, a tensometr T3 1125 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 7,5-7,8 s, najmniejsza wartość dla tensometru T2 wyniosła 399 ADU, tensometr T1 wskazał 1364 ADU, oraz tensometr

T3 1029 ADU. W przypadku uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 1,1-1,6 s w trakcie tego odczytu uzyskano największe wartości, odpowiednio 1706 ADU z tensometru T2, 1490 ADU z tensometru T1 oraz 998 ADU z tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 4,5-5,0 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 1156 ADU, dla tensometru T1 było to 1402 ADU oraz 1103 ADU dla tensometru T3. W przejściu 3 zarejestrowane największe wartości w zakresie pomiędzy 7,9-8,4 s dla tensometru T2 było to 1374 ADU, tensometr T1 wskazał 1347 ADU, a tensometr T3 1055 ADU.

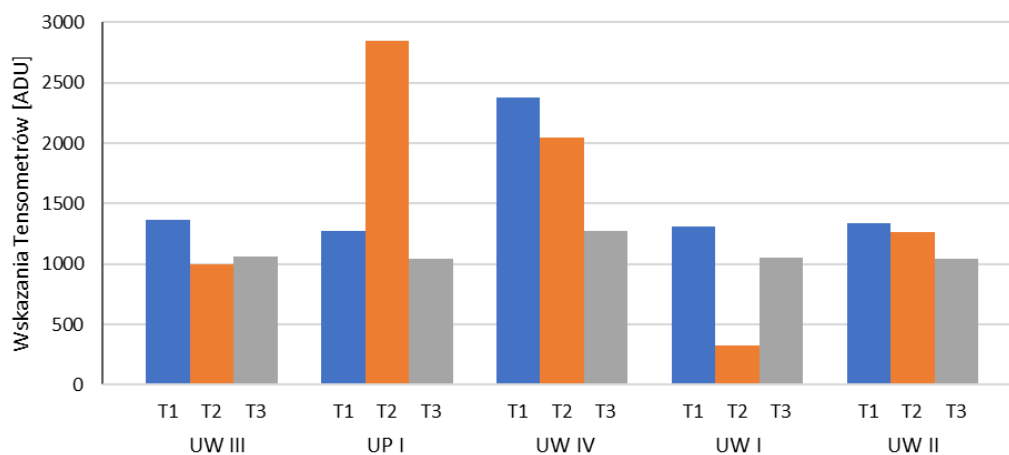
Tab. 5.42. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 10

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	-	-	-	2290	1933	1356	1473	391	1076	1490	1706	998
Przejście 2	1469	1097	1121	1374	2848	1073	2782	2723	1163	1372	316	1125	1402	1156	1103
Przejście 3	1413	850	1045	1390	2797	1080	2620	2195	1353	1364	399	1029	1347	1374	1055



Rys. 5.122. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

Na rys. 5.123 zestawiono wyniki, które potwierdzają, że zakłócenia w porównaniu do wzorcowego przebiegu sygnału podczas monitorowania nieuszkodzonej taśmy, są powtarzalne i identyfikowalne. Podczas pomiarów przy prędkości $n_2 = 318$ obr/min uszkodzenie UW III wygenerowało rozkład nacisków w którym, tensometr T2 wskazał największy spadek wartości, natomiast najmniej obciążonym był zewnętrzny T1.



Rys. 5.123. Zestawienie wskazań tensometrów przy prędkości $n_2 = 318$ obr/min (oprac. własne)

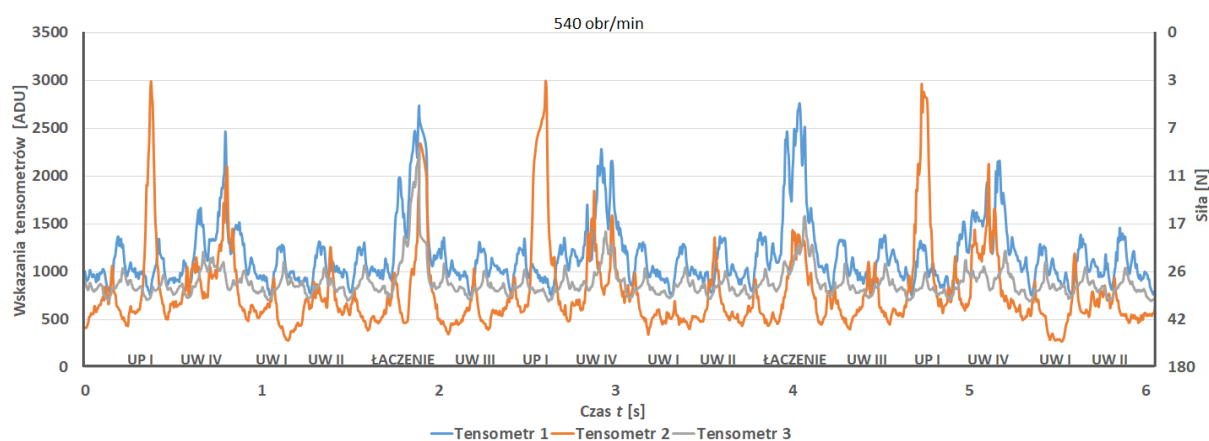
Uszkodzenie UP I wygenerowało najbardziej zróżnicowany rozkład wartości wskazań, największa wartość znacznie odbiega od pozostałych i przypada na T2. Uszkodzenie UW IV wygenerowało rozkład wartości wskazań, w którym największa przypada na T1, natomiast największy nacisk taśmy przypada na tensometr T3. Uszkodzenie UW I wygenerowało rozkład wskazań, w którym najbardziej obciążonym był środkowy T2. Pozostałe tensometry wskazały większe wartości, z których największa przypada na T1. Uszkodzenie UW II wygenerowało schodkowy rozkład wskazań, największą wartość wskazania przypada na T1, natomiast najmniejsza na T3.

Etap 1, prędkość 540 obr/min

W trakcie pomiaru nr 3 przy prędkości obrotowej $n_3 = 540$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.43 oraz zwizualizowane na rysunku 5.124. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 2 występują pomiędzy 2,1-2,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1037 ADU, dla tensometru T1 było to 1310 ADU oraz tensometru T3 1017 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 3 występuje pomiędzy 4,1-4,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1107 ADU, 1384 ADU dla tensometru T1 oraz 1086 ADU dla tensometru T3. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 0,1-0,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2995 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1345 ADU, a tensometr T3 970 ADU. W przejściu 2 zakres wskazań występuje pomiędzy 2,5-2,8 s. Największa wartość wskazania dla tensometru T2 wyniosła 2999 ADU, w przypadku tensometru T1 było 1347 ADU, natomiast tensometr T3 wskazał największą wartość 1025 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 4,5-4,8 s, dla tensometru T2 było to 2962 ADU, dla tensometru T1 1322 ADU, a tensometr T3 998 ADU. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW IV pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 0,5-0,8 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 2094 ADU w przypadku tensometru T2 i 2466 ADU dla tensometru T1 oraz 1211 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 2,9-3,2 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1841 ADU, 2284 ADU w przypadku tensometru T1 oraz 1424 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 5,0-5,3 s, największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2113 ADU, tensometru T1 2163 ADU oraz tensometru T3 1215 ADU. Uszkodzenie UW I w przejściu 1 występuje pomiędzy 0,9-1,2 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 283 ADU, tensometr T1 wskazał wtedy 1284 ADU, natomiast tensometr T3 wskazał 1107 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 3,3-3,6 s, najmniejsza wartość dla tensometru T2 wyniosła 345 ADU, tensometr T1 wskazał 1309 ADU, a tensometr T3 1036 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 5,4-5,7 s, najmniejsza wartość dla tensometru T2 wyniosła 277 ADU, tensometr T1 wskazał 1288 ADU, a tensometr T3 1108 ADU. W przypadku uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 1,3-1,6 s w trakcie tego pomiaru uzyskano 1262 ADU dla tensometru T2 oraz 1316 ADU dla tensometru T1 i 1044 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,7-4,0 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 1361 ADU, dla tensometru T1 było to 1367 ADU oraz 1050 ADU tensometru T3. W przejściu 3 zarejestrowane największe wartości w zakresie pomiędzy 5,8-6,1 s, dla tensometru T2 było to 1194 ADU, tensometr T1 wskazał 1385 ADU, natomiast tensometr T3 wskazał 1050 ADU.

Tab. 5.43. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 3

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	-	-	-	1345	2995	970	2466	2094	1211	1284	283	1107	1316	1262	1044
Przejście 2	1310	1037	1017	1347	2999	1025	2284	1841	1424	1309	345	1036	1367	1361	1050
Przejście 3	1384	1107	1086	1322	2962	998	2163	2113	1215	1288	277	1108	1385	1194	1050



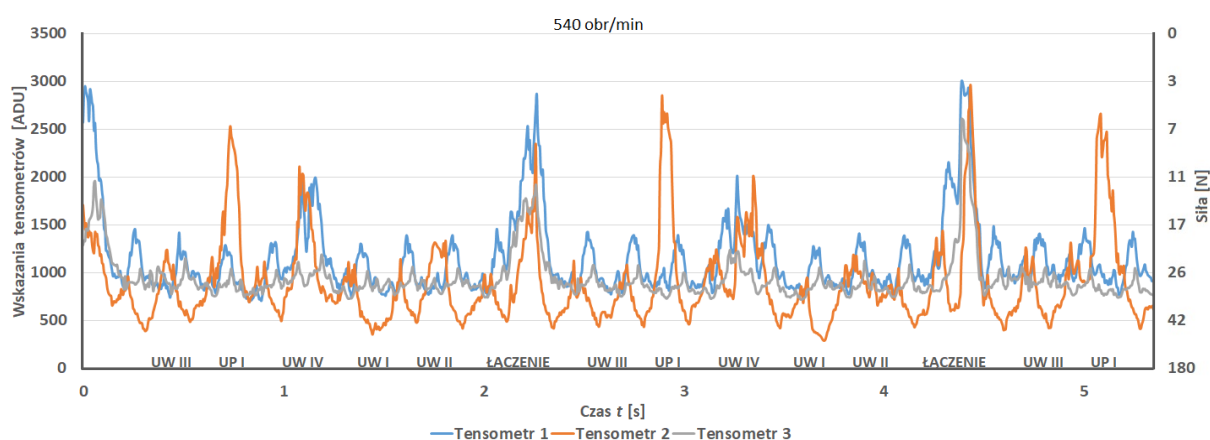
Rys. 5.124. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Podczas pomiaru nr 7 przy prędkości obrotowej $n_3 = 540$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.44 oraz zwizualizowane na rysunku 5.125. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 1 występują pomiędzy 0,2-0,5 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1227 ADU, dla tensometru T1 było to 1417 ADU oraz dla tensometru T3 1152 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 2 występuje pomiędzy 2,3-2,6 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1120 ADU, 1419 ADU dla tensometru T1 oraz 1080 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 4,6-4,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1218 ADU, dla tensometru T1 było to 1406 ADU oraz dla tensometru T3 1062 ADU. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 0,6-0,9 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2530 ADU, wartość wskazania tensometru T1 wyniosła 1287 ADU oraz wartość 1045 ADU dla tensometru T3. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 2,7-3,0 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2848 ADU, dla tensometru T1 było to 1392 ADU oraz 1005 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 5,0-5,3 s, dla tensometru T2 największa wartość wskazania wyniosła 2658 ADU, natomiast tensometr T1 wskazał 1464 ADU, a tensometr T3 1045 ADU. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW IV pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 1,0-1,3 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 2032 ADU dla tensometru T2 i 1993 ADU dla tensometru T1 oraz 1191 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,1-3,4 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2004 ADU, tensometru T1 wskazał 2012 ADU oraz 1237 ADU dla tensometru T3. Uszkodzenie UW I w przejściu 1 występuję pomiędzy 1,4-1,7 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 348 ADU, tensometr T1 wskazał największą wartość 1300 ADU, natomiast tensometr T3 wskazał 1020 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 3,5-3,8 s, dla tensometru T2 było to 283 ADU, tensometr T1 wskazał 1275 ADU, a tensometr T3 1033 ADU. W przypadku

uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 1,8-2,1 s, w trakcie tego pomiaru uzyskano wartość 1312 ADU dla tensometru T2 oraz 1389 ADU dla tensometru T1, tensometru T3 wskazał 1065 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,9-4,2 s. Zmierzona największa wartość dla tensometru T2 wyniosła 1183 ADU, dla tensometru T1 było to 1406 ADU oraz 1126 ADU dla tensometru T3.

Tab. 5.44. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 7

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1417	1227	1152	1287	2530	1045	1993	2032	1191	1300	348	1020	1389	1312	1065
Przejście 2	1419	1120	1080	1392	2848	1005	2012	2004	1237	1275	283	1033	1406	1183	1126
Przejście 3	1406	1218	1062	1464	2658	1045	-	-	-	-	-	-	-	-	-



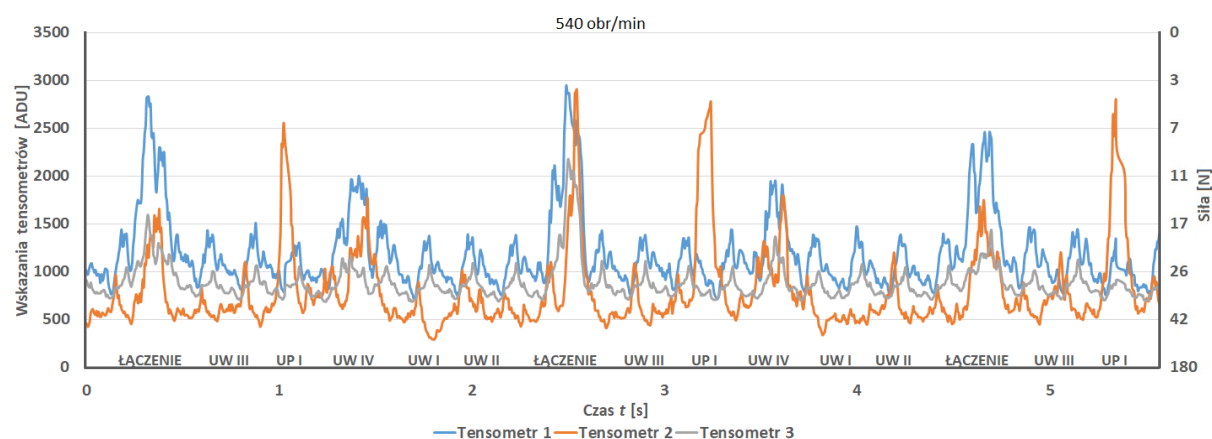
Rys. 5.125. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

W trakcie pomiaru nr 8 przy prędkości obrotowej $n_3 = 540$ obr/min otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 5.45 oraz zwizualizowane na rysunku 5.126. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW III w przejściu 1 występują pomiędzy 0,4-0,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1103 ADU, dla tensometru T1 było to 1507 ADU oraz dla tensometru T3 1069 ADU. Zakres charakterystycznych dla tego uszkodzenia wskazań w przejściu 2 występuje pomiędzy 2,7-3,0 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1091 ADU, 1382 ADU dla tensometru T1 oraz wartość 1110 ADU dla tensometru T3. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu 3 występują pomiędzy 4,9-5,2 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 1203 ADU, wartość wskazania tensometru T1 1394 ADU natomiast tensometr T3 wskazał 1129 ADU. W przypadku uszkodzenia UP I zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 0,9-1,1 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2557 ADU, 1300 ADU dla tensometru T1 oraz 1021 ADU dla tensometru T3. W przejściu 2 wskazania identyfikujące uszkodzenie występują pomiędzy 3,1-3,3 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2779 ADU, tensometru T1 wskazał wartość 1355 ADU, a tensometru T3 1060 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 3 występuje pomiędzy 5,3-5,6 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 2831 ADU, dla tensometru T1 było to 1247 ADU, natomiast tensometru T3 wskazał wartość 978 ADU. Wskazania UW IV pojawiają się, w momencie przejścia 1 pomiędzy 1,2-1,5 s, tensometry wskazały największe wartości odpowiednio 1776 ADU dla tensometru T2 i 1999 ADU dla tensometru T1 oraz 1142 ADU dla tensometru T3. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 3,4-3,7 s. Największa wartość wskazania tensometru T2 wyniosła wtedy 1802 ADU, dla tensometru T1 było to 1946 ADU oraz

1370 ADU dla tensometru T3. Wskazania odpowiadające uszkodzeniu UW I w przejściu 1 występują pomiędzy 1.6-1,9 s, najmniejsza wartość wskazania tensometru T2 wyniosła 289 ADU, największa wartość dla tensometru T1 to 1370 ADU, oraz dla tensometr T3 1070 ADU. W przejściu 2 zarejestrowano wartości identyfikujące uszkodzenie w zakresie pomiędzy 3.8-4,1 s, dla tensometru T2 była to najmniejsza wartość 335 ADU, tensometr T1 wskazał 1469 ADU, natomiast tensometr T3 wskazał 1080 ADU. W przypadku uszkodzenia UW II zakres odpowiednich wskazań podczas przejścia 1 znalazł się pomiędzy 2,0-2,3 s, w trakcie tego pomiaru uzyskano największa wartość 1015 ADU z tensometru T2 oraz 1388 ADU z tensometru T1 dla tensometru T3 było to 1088 ADU. Zakres wskazań identyfikujących uszkodzenie w przejściu 2 występuje pomiędzy 4,2-4,5 s. Zmierzona największa wartość tensometru T2 wyniosła 1201 ADU, tensometru T1 wskazał wartość 1383 ADU natomiast tensometru T3 1048 ADU.

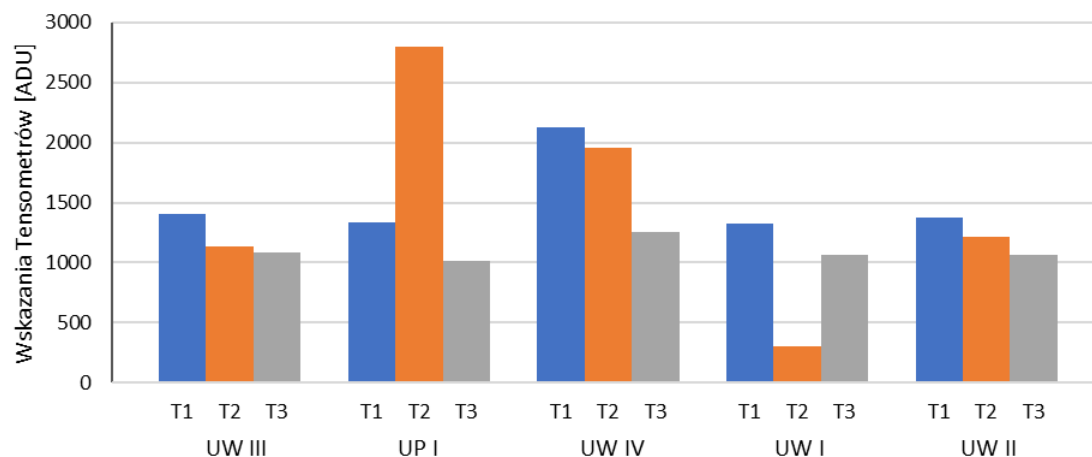
Tab. 5.45. Wskazania tensometrów [ADU] w punktach charakterystycznych, pomiar 8

Typ uszkodzenia	UW III			UP I			UW IV			UW I			UW II		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Przejście 1	1507	1103	1069	1300	2557	1021	1999	1776	1142	1370	289	1070	1388	1015	1088
Przejście 2	1382	1091	1110	1355	2779	1060	1946	1802	1370	1469	335	1080	1383	1201	1048
Przejście 3	1394	1203	1129	1247	2831	978	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Rys. 5.126. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

Zestawienie zbiorcze na rysunku 5.127 ukazuje identyfikowalne zakłócenia sygnałów, powiązanych z uszkodzeniami taśmy przenośnikowej.

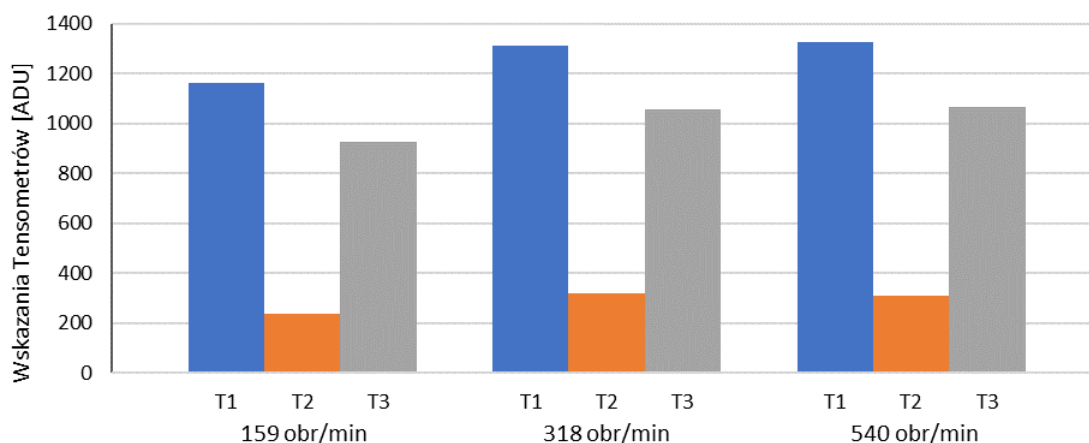


Rys. 5.127. Zestawienie wskazań tensometrów przy prędkości $n_3 = 540$ obr/min (oprac. własne)

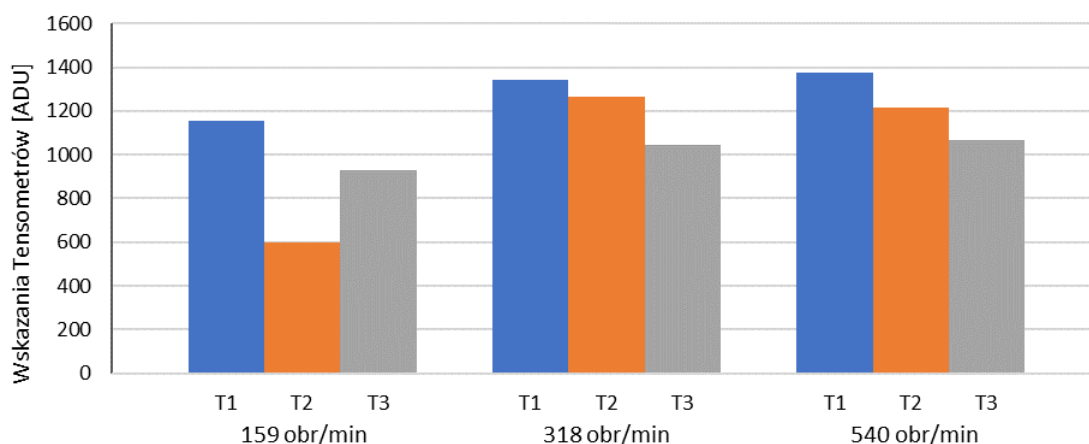
Podczas pomiarów przy prędkości $n_3 = 540$ obr/min uszkodzenie UW III wygenerowało rozkład nacisków w którym, tensometr T3 wskazał największy spadek wartości, natomiast najmniej obciążonym był zewnętrzne T1. Uszkodzenie UP I wygenerowało najbardziej zróżnicowany rozkład wartości wskazań, największa wartość znacznie odbiega od pozostałych i przypada na tensometr T2. Uszkodzenie UW IV wygenerowało rozkład wartości wskazań, w którym największa przypada na T1, natomiast największy nacisk taśmy przypada na tensometr T3. Uszkodzenie UW I wygenerowało rozkład wskazań, w którym najbardziej obciążonym był środkowy T2. Pozostałe tensometry wskazały większe wartości, z których największa przypada na T1. Uszkodzenie UW II wygenerowało schodkowy rozkład wskazań, największą wartość wskazania przypada na T1, dla T3 przypada najmniejsza wartość wskazań.

Podsumowanie Etapu 1

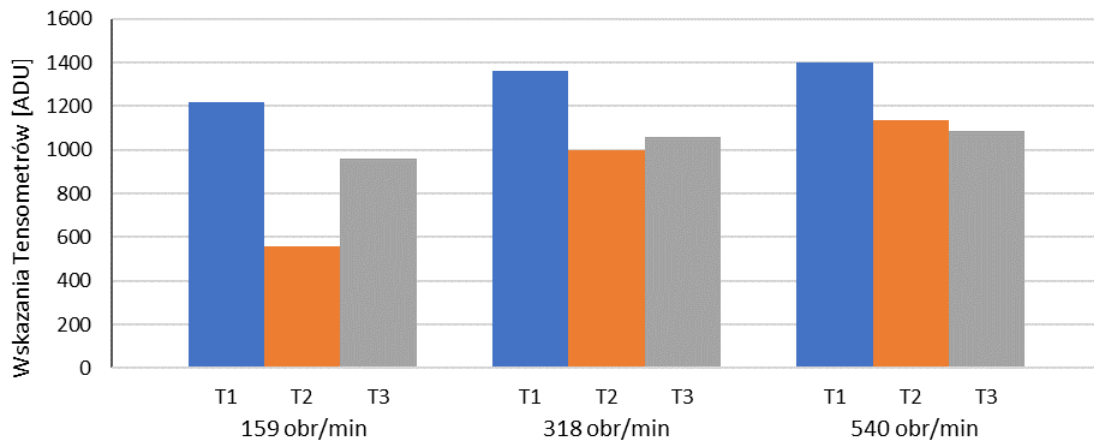
Wyniki tego etapu badań można podsumować następująco. Wpływ prędkości na charakterystyczne wartości wskazań tonometrów można prześledzić na rysunkach 5.128-5.132, gdzie uszkodzenia w sposób widoczny generują wzrost wartości wskazań wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Wzrost jest szczególnie zauważalny dla prędkości w zakresie pomiędzy 159-318 obr/min dla uszkodzeń wzdłużnych typu UW. Uszkodzenie UW I wygenerowało inny rozkład nacisków na tensometry niż pozostałe cztery, przy czym tensometr środkowy jest znacznie bardziej obciążony. Rozkład nacisków generowany przez UW II przy prędkości 540 obr/min osiąga podobny charakter wskazań jak dla uszkodzenia UP 1.



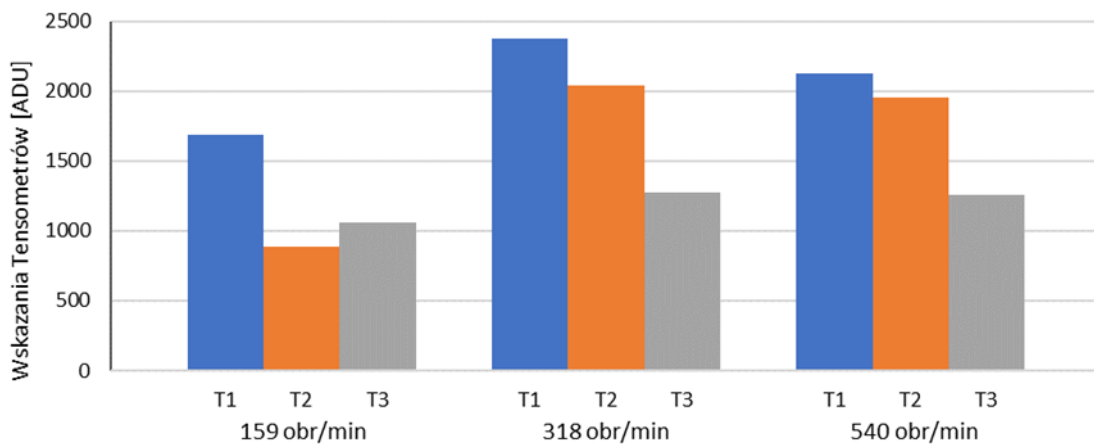
Rys. 5.128. Zestawienie wskazań tensometrów dla uszkodzenia UW I (oprac. własne)



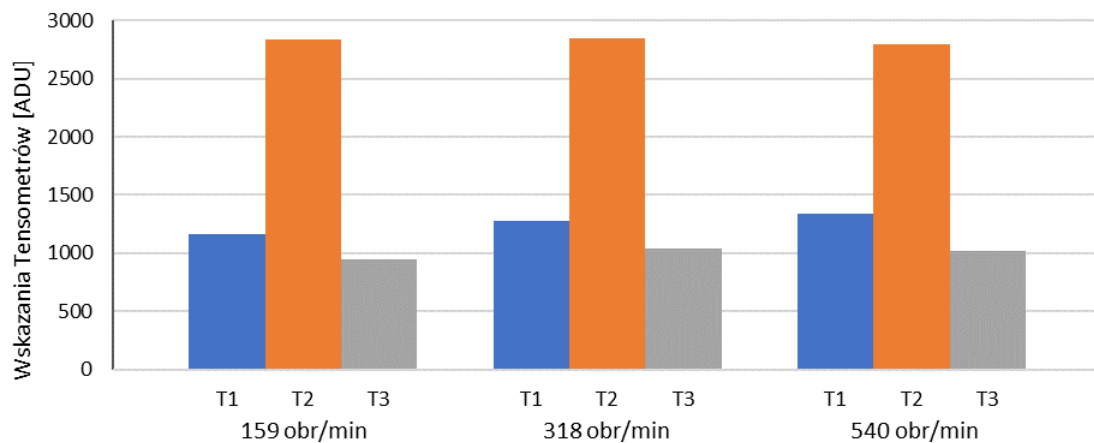
Rys. 5.129. Zestawienie wskazań tensometrów dla uszkodzenia UW II (oprac. własne)



Rys. 5.130. Zestawienie wskazań tensometrów dla uszkodzenia UW III (oprac. własne)



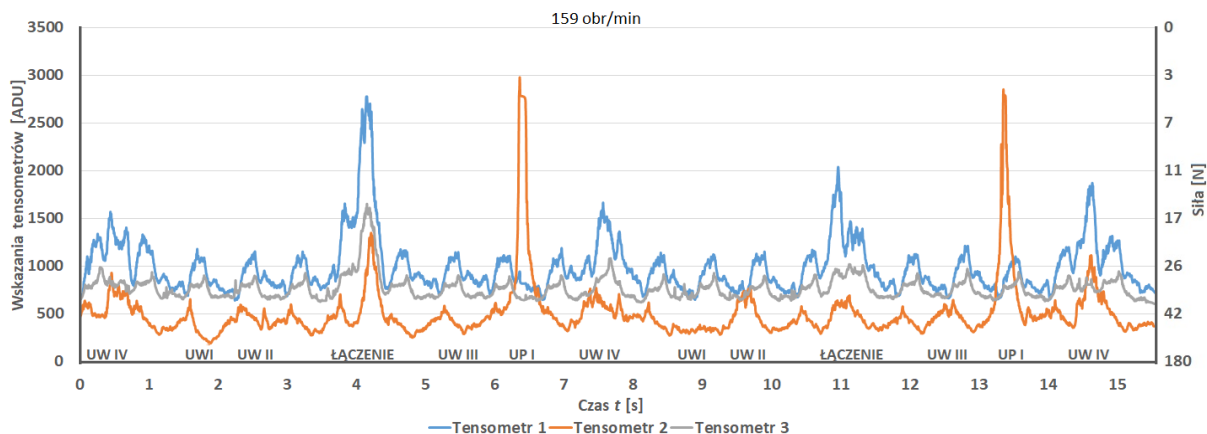
Rys. 5.131. Zestawienie wskazań tensometrów dla uszkodzenia UW IV (oprac. własne)



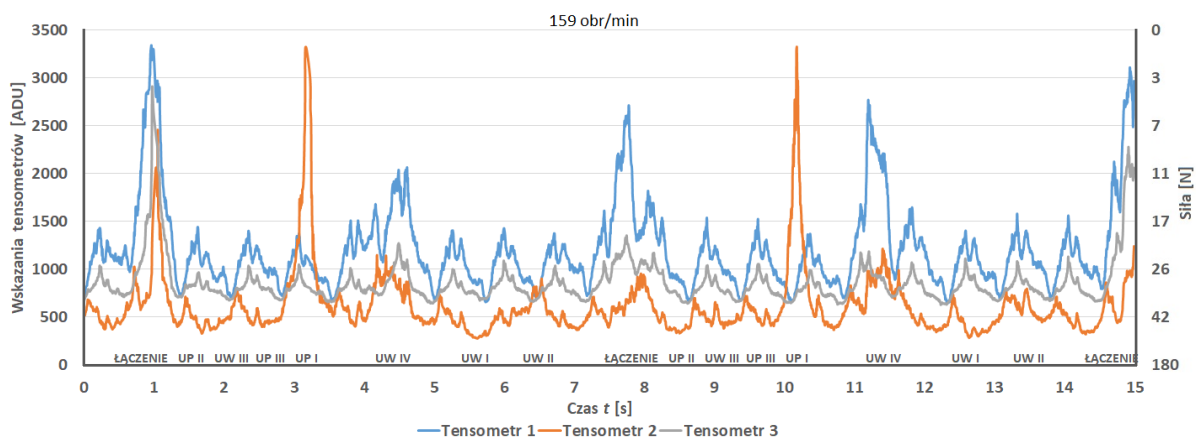
Rys. 5.132. Zestawienie wskazań tensometrów dla uszkodzenia UP I (oprac. własne)

Etap 2, prędkość 159 obr/min

Podobnie jak dla taśmy nr 1, poniżej przedstawiono dwie charakterystyki zawierające sygnały identyfikujące odpowiednio 5 uszkodzeń rys. 5.133 przy prędkości $n_1 = 159$ obr/min oraz 7 uszkodzeń rys. 5.134 przy tej samej prędkości. Dodatkowo dwa uszkodzenia zostały wykonane na jednej z krawędzi taśmy od strony tensometru zewnętrznego T1.



Rys. 5.133. Wskazania tensometrów, 5 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



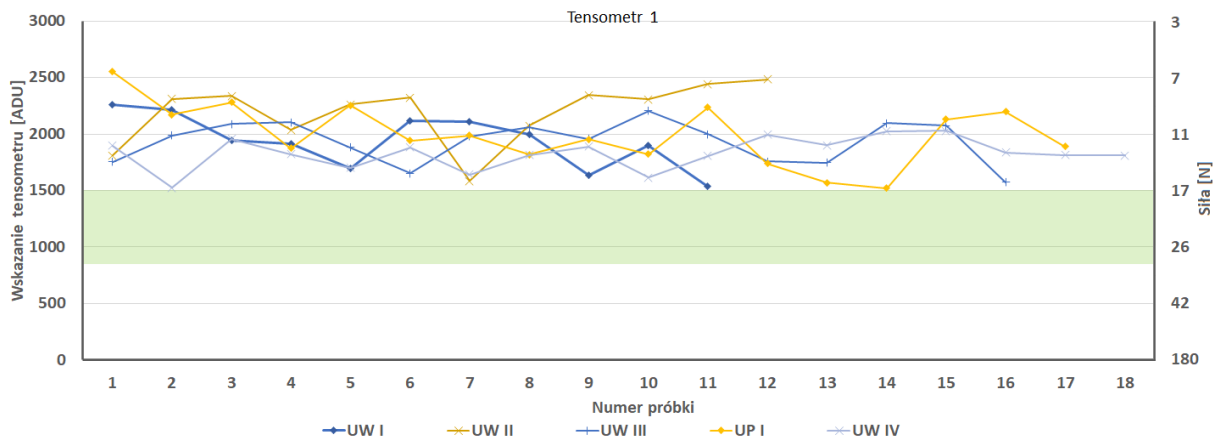
Rys. 5.134. Wskazania tensometrów, 7 uszkodzeń, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

Dwa poprzeczne nacięcia krawędzi taśmy od strony tensometru T1 spowodowały wzrost wartości amplitudy wartości oraz zmniejszenia naciągu taśmy. Zauważalne są inne wskazania, pozwalające na identyfikację uszkodzeń wykonanych na środkowej części taśmy. Przebieg sygnału dla uszkodzonej taśmy w odniesieniu do taśmy bez uszkodzenia krawędzi jest zaburzony. W warunkach badań dynamicznych taśma zaczęła zbiegać unieruchamiając przenośnik, a tym samym uniemożliwiając dalszy pomiar oraz odczyt wyników. Niestety ten moment nie został zarejestrowany, a jego powtórzenie jest niecelowe. Na tym etapie badań można jedynie stwierdzić, że zanim nastąpiło zakleszczenie taśmy czujniki tensometryczne wykazały zakłócenia przebiegu sygnału. Z punktu widzenia praktycznego zastosowania taki sygnał, zarejestrowany i dokładnie przeanalizowany, umożliwiłby wczesne wykrycie zagrożenia i wyłączenie przenośnika unikając awarii, co zwiększa bezpieczeństwo pracy. Stan przedawaryjny powodujący zatrzymanie taśmy został przedstawiony na rys. 5.134, wartości wskazań tensometrów sygnalizują spadek nacisku taśmy, szczególnie jest to widoczne dla tensometru T1, będącego najbliższym uszkodzeń UP II oraz UP III.

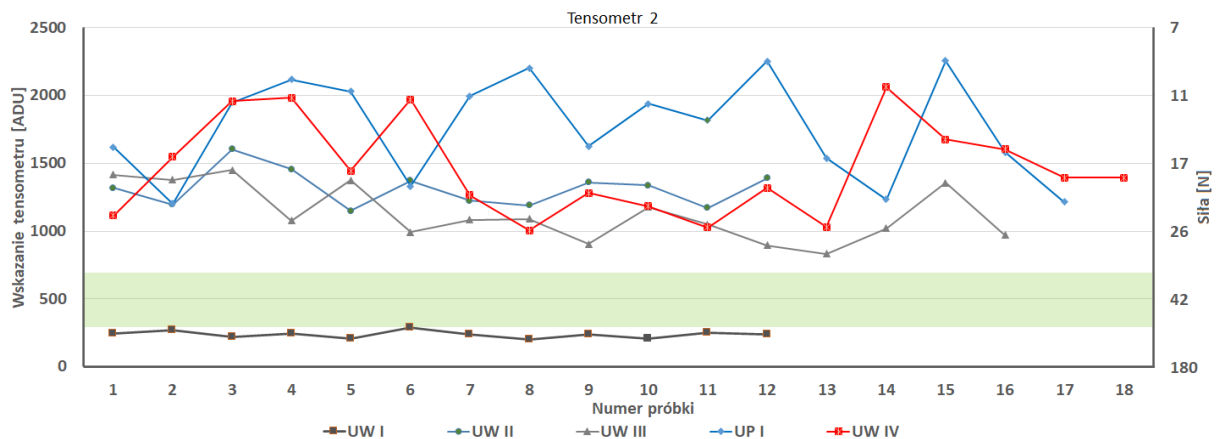
Charakter i cechy analizowanego sygnału uszkodzeń taśmy przenośnikowej

Przedstawione na wykresach rys. 5.135 – 5.137 wyniki pokazują kolejne wskazania w trakcie wykonywania pomiarów dynamicznych przy prędkości $n_l = 159$ obrotów na minutę. Przebieg sygnałów potwierdza omówiony już wcześniej podwójnie nieliniowy charakter układu pomiarowego, tj. jest nieliniowy charakter wskazań podczas wywierania nacisku o różnej wartości siły na tensometr oraz nieliniowy charakter wskazań zależny od miejsca przyłożenia obciążenia do tensometru, a tym samym zależny od kąta położenia tensometrów względem wałka oraz taśmy przenośnikowej. Układ pozwala na wyznaczenie pasma wartości najmniejszych i największych dla taśmy, która nie posiadała

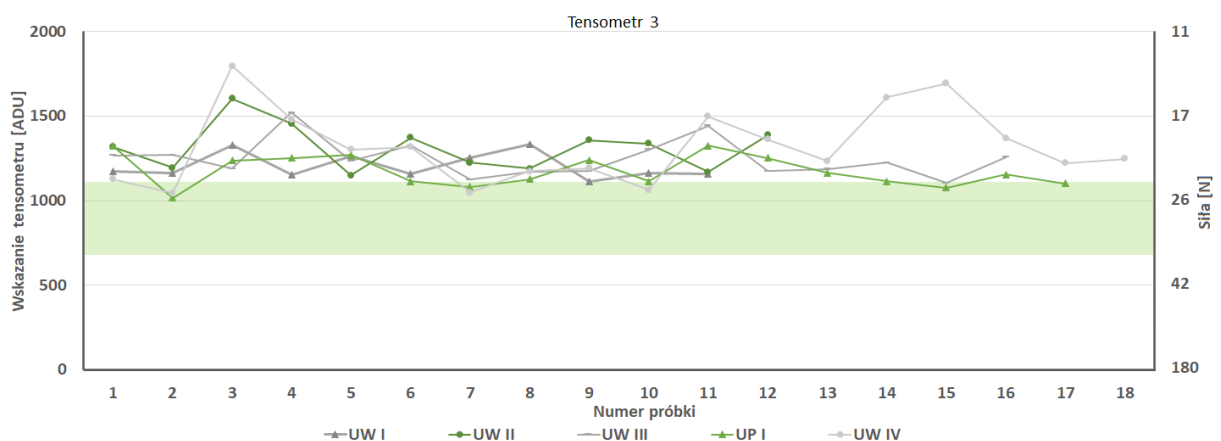
uszkodzeń, co zostało wykonane i zaznaczone kolorem zielonym na wykresach jako obszar referencyjny. Zostały obliczone wartości średnie dla każdego uszkodzenia oraz każdego tensometru. Wielkości wartości średnich odpowiadają odległością oraz umiejscowieniem wcześniej wykonanych uszkodzeń na taśmie.



Rys. 5.135. Rozkład wskazań 5 uszkodzeń, tensometr T1, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.136. Rozkład wskazań 5 uszkodzeń, tensometr T2, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)



Rys. 5.137. Rozkład wskazań 5 uszkodzeń, tensometr T3, prędkość $n_l = 159$ obr/min (oprac. własne)

W tabeli 5.46 przedstawiono wyniki wartości średnich dla każdego z tensometrów odpowiadające wykresom. Wskazania pokazują, że tensometr T3 wykrył największą wartość dla uszkodzenia wzdłużnego IV tj. tego które to znajdowało się pomiędzy tensometrem środkowym T2 oraz tensometrem zewnętrznym T3 i było to uszkodzenie najbliższe odległości (rys. 5.113) od

tensometru T3, z kolei najmniejsze wartości wykrył dla najdalej położonego uszkodzenia tj. uszkodzenia wzdłużnego UW I. W przypadku tensometru zewnętrznego T1 ma miejsce sytuacja odwrotna, wartości najmniejsze zostały wskazane dla uszkodzenia wzdłużnego UW IV, które znajdowało się w największej odległości od tensometru w linii prostej. Natomiast największe wartości zostały zarejestrowane dla największego uszkodzenia na taśmie tj. przecięcia o długości 70 mm oznaczonego jako UW II. Tensometr środkowy T2 podobnie jak tensometr zewnętrzny T3 wskazał największe wartości dla uszkodzenia UW II. W przypadku uszkodzenia taśmy UW I, tj. przecięcia przesuniętego o 5 mm od środka tensometru T2, występuje charakterystyczne odmienne od pozostałych wskazanie. Przecięcie powoduje lokalny wzrost siły nacisku taśmy F_n na powierzchnię tensometru T2, podczas gdy inne uszkodzenia powodują spadek siły F_n , w związku z tym analizowane były najmniejsze wartości amplitudy sygnału.

Tab. 5.46. Zestawienie wartości średnich

Typ uszk. \ Tensometr	UW I [ADU]	UW II [ADU]	UW III [ADU]	UP I [ADU]	UW IV [ADU]
T1	1938	2193	1932	1997	1823
T2	237	1989	1123	1794	1455
T3	1206	1314	1249	1175	1362

Na podstawie zarejestrowanych wykresów jednoznacznie można wykryć obecność uszkodzenia uszkodzenie występujące na taśmie. Analiza statystyczna wartości charakterystycznych wcześniej wykonanych uszkodzeń jednoznacznie pozwala stwierdzić, że układ pomiarowy wykrywa zadane uszkodzenia w postaci nacięć części powierzchni taśmy oraz identyfikuje większe uszkodzenia w postaci całkowitych przecięć taśmy w kierunku wzdłużnym oraz w kierunku poprzecznym. W związku z tym spełnia postawioną w rozprawie tezę oraz pozwala na monitorowanie stanu taśmy przenośnikowej w trakcie pracy przenośnika. Tym samym pozwala użytkownikowi na wykrycie uszkodzenia już na wczesnym etapie powstania, oraz na podjęcie odpowiednich działań w celu zniwelowania efektu rozrostu danego uszkodzenia. Odczyt wskazań tensometrów taśmy podczas badań dynamicznych w porównaniu do badań obciążania poszczególnych sektorów taśmy, zawiera istotną różnicę. Monitorowanie taśmy obciążonej odbywało się przez obciążanie odważnikami powierzchni nieuszkodzonej wcześniej taśmy, natomiast w przypadku monitorowania stanu technicznego taśmy wykonane zostały uszkodzenia, kwalifikowane jako niezgodności lub wady. W warunkach pracy analizując wykresy oraz wartości wskazań już pierwsze pomiary sygnalizują że maksymalne lub minimalne wartości odbiegają od wyznaczonego pasma wartości dla taśmy bez uszkodzeń.

Podsumowując, cel badawczy został osiągnięty, a postawiona teza dotycząca możliwości wykrywania uszkodzeń taśmy przenośnikowej za pomocą tensometrycznego systemu została udowodniona. Przeprowadzone badania wskazują na zdolność systemu tensometrycznego do wykrywania nie tylko zsunęcia taśmy z bębna lub jej zerwania, ale też niewielkich uszkodzeń. W ramach niniejszej rozprawy zdołano wykonać badania dla kilku rozcięć i nacięć wzdłużnych i poprzecznych, imitujących wczesny etap uszkodzeń oraz istotne wady, co jedynie w niewielkim stopniu odpowiada zdarzeniom, występującym w czasie pracy przenośnika taśmowego. W dalszych badaniach przewiduje się nie tylko wykonanie większej liczby różnych uszkodzeń, np. rozcięć wzdłużnych czy wyrwań, ale też analizę wskazań tensometrów w czasie pracy obciążonej taśmy z uszkodzeniami.

5.2.4. Wytrzymałość taśmy na zrywanie

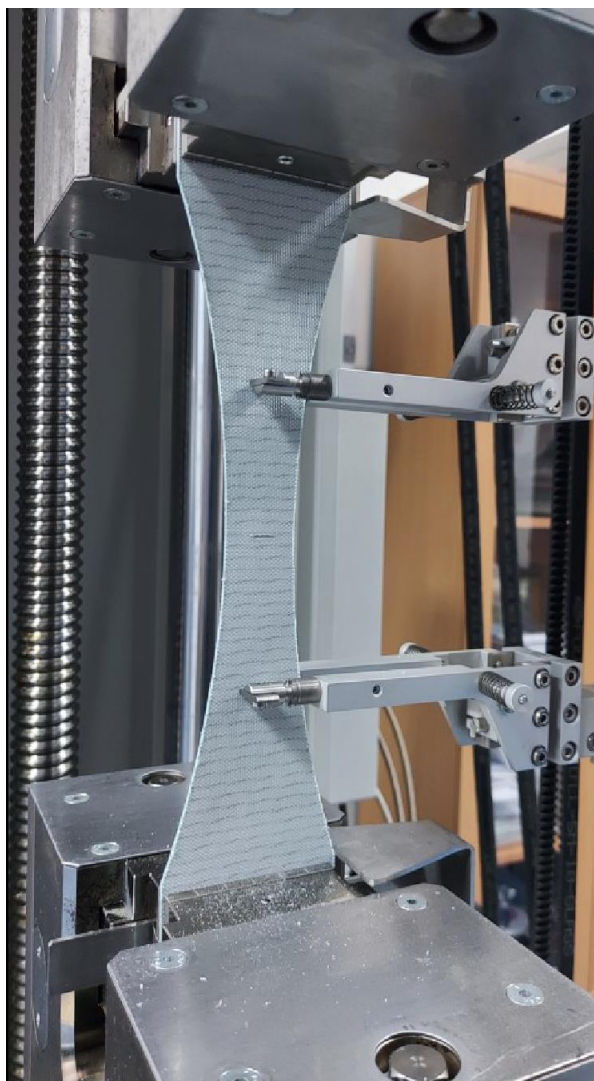
W celu kwalifikacji taśmy przenośnikowej do częściowej naprawy lub wymiany przez identyfikację jej uszkodzeń powstałych na wczesnym etapie, wykonano dodatkowe badania wytrzymałości taśmy na zrywanie (Ryba i in., 2024). Wykonane nacięcia zakwalifikowano jako niezgodności w postaci uszkodzeń tylko części przekroju taśmy oraz wad, do których zaliczono uszkodzenie całego przekroju (tab 5.14). Do skorelowania wyników uszkodzeń oraz określenia zależności pomiędzy uszkodzeniami jakościowymi i ilościowymi wykonano test statycznego rozciągania próbek, uprzednio uszkodzonych wycięciem zgodnie z kierunkiem pracy taśmy. Zasymulowano zestaw uszkodzeń na nowej taśmie, na której wykonano uszkodzenia analogiczne do tych, wykonanych podczas badań monitorowania pracy taśmy za pomocą układu tensometrycznego (charakter uszkodzeń opisano w rozdziale 5.2.3)

Dla uszkodzonej taśmy Enitra EDV08PB-AS 2.0 wyznaczono właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu wg normy DIN EN ISO 527-1:2019, dla próbki typu C wyciętej według normy PN-EN ISO 283: 2016-01.

Tab. 5.47. Parametry próby statycznego rozciągania

Parametr	Wartość
Siła wstępna	$F_{brl} = 1,5 \text{ MPa}$
Prędkość, przy badaniu modułu sprężystości wzdłużnej	$V_{brl} = 10 \text{ mm/min}$
Prędkość badania	$V_{bl} = 100 \text{ mm/min}$
Odległość uchwytów przy pozycji startowej	$L_{bl} = 233,46 \text{ mm}$
Długość pomiarowa standardowej drogi	$L_{brl} = 100 \text{ mm}$
Szerokość odcinka pomiarowego	$W_{bl} = 25 \text{ mm}$
Grubość odcinka pomiarowego	$T_{bl} = 2 \text{ mm}$

Umieszczoną w urządzeniu próbkę taśmy w chwili badań pokazano na rys. 5.138. Zarejestrowane w trakcie pomiarów wyniki próby statycznego rozciągania przedstawiono w tabeli 5.48. Wskazują one na anizotropowe właściwości taśmy przenośnikowej, co szczegółowo zostało opisane w rozdziale dotyczącym opisu badanej taśmy. Dla próbki bez uszkodzeń, wyciętej wzdłużnie, wartość naprężenia zrywającego wyniosła 84,2 MPa, natomiast wydłużenie względne 26,1 %. Zerwanie próbki podczas próby statycznego rozciągania próbki z uszkodzeniem typu poprzecznego UP I, które jest wykonane na środku taśmy (rys. 5.76), następuje przy najmniejszym wydłużeniu sięgającym 9,8% przy wartości siły $F_m = 1554,6 \text{ N}$. Uszkodzenie to jest identyfikowane przez tensometr środkowy T2 (rys. 5.118), jako największy skok wartości, co również zostało przedstawione na innych wcześniej przedstawionych wykresach.

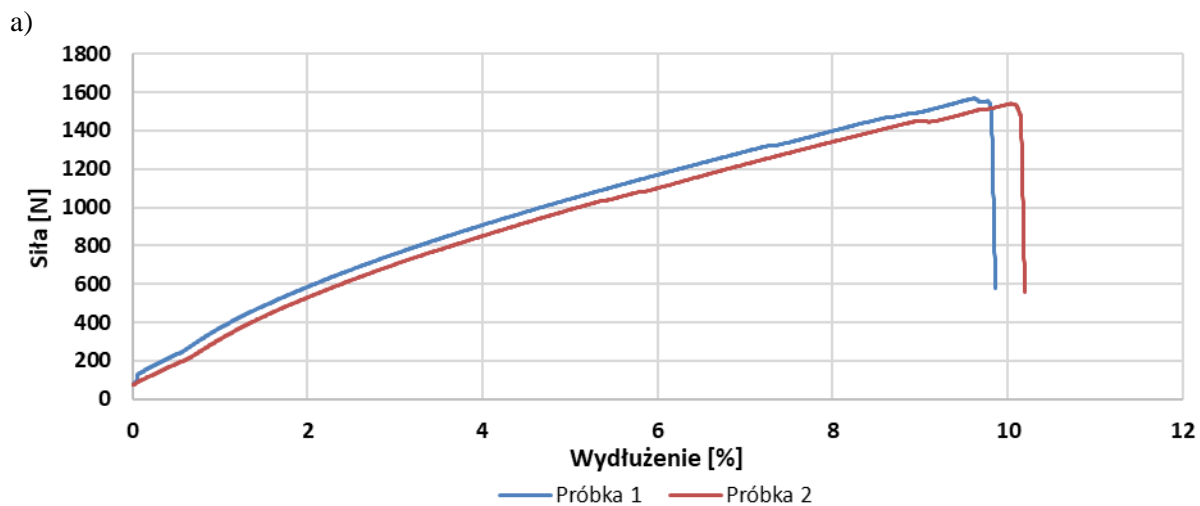


Rys. 5.138. Próbkę taśmy podczas próby statycznego rozciągania (Ryba i in., 2024)

Tab. 5.48. Wyniki pomiarów wartości średnich próby statycznego rozciągania

Oznaczenia	Bez uszk. wzdl.	Bez uszk. poprz.	UW I	UW II	UW III	UW IV	UP I	UP I _{POPZ.}
E_t [MPa]	633,1	737,2	598	645,8	615,5	616,3	435,3	460,3
σ_x [MPa]	36,0	24,3	35,5	35,6	34,9	34,6	30,7	21,6
σ_m [MPa]	82,8	47,7	83,7	83,4	83,4	82,6	31,1	23,2
ε_M [%]	27,1	29,2	28	26,9	27,4	27,5	9,8	11,4
σ_B [MPa]	82,8	40,0	83,7	83,4	83,4	82,6	31,1	23,2
ε_B [%]	27,1	29,3	28	26,9	27,4	27,5	9,8	11,4
ε_{tB} [%]	27,2	29,9	28	27,1	27,5	27,6	9,8	11,3
F_m [N]	4212,3	2358,7	4215,0	4237,3	4242,1	4202,0	1568,8	1208,9

Na rysunkach 5.139 a i b zostały przedstawione wyniki próby statycznego rozciągania dwóch próbek z zadaniem uszkodzeniem w postaci poprzecznego przecięcia o długości 10 mm, znajdującego się w środkowej części próbki (5.139b). W przypadku tego typu uszkodzenia zmniejszony przekrój poprzeczny był bezpośrednim czynnikiem wpływającym na miejsce zerwania próbki w widocznym na fotografii miejscu.



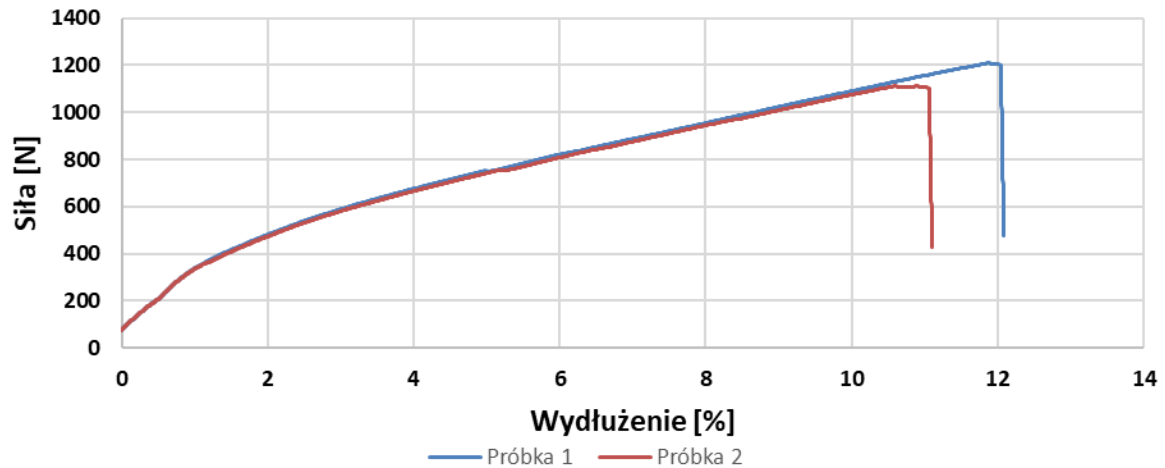
b)



Rys. 5.139. Wyniki statycznego rozciągania, uszkodzenie UP I
a) wykres, b) zdjęcia próbek po zerwaniu (Ryba i in., 2024)

Na rysunkach 5.140 a i b zostały przedstawione wyniki próby statycznego rozciągania dwóch próbek UP I_{POPRZ} wyciętych poprzecznie z zadaniem uszkodzeniem w postaci poprzecznego przecięcia o długości 10 mm, znajdującego się w środkowej części próbki (5.140b). W przypadku tego typu uszkodzenia zmniejszony przekrój poprzeczny był bezpośrednim czynnikiem wpływającym na miejsce zerwania próbki w widocznym na fotografii miejscu, podobnie jak dla próbki oznaczonej UP I.

a)



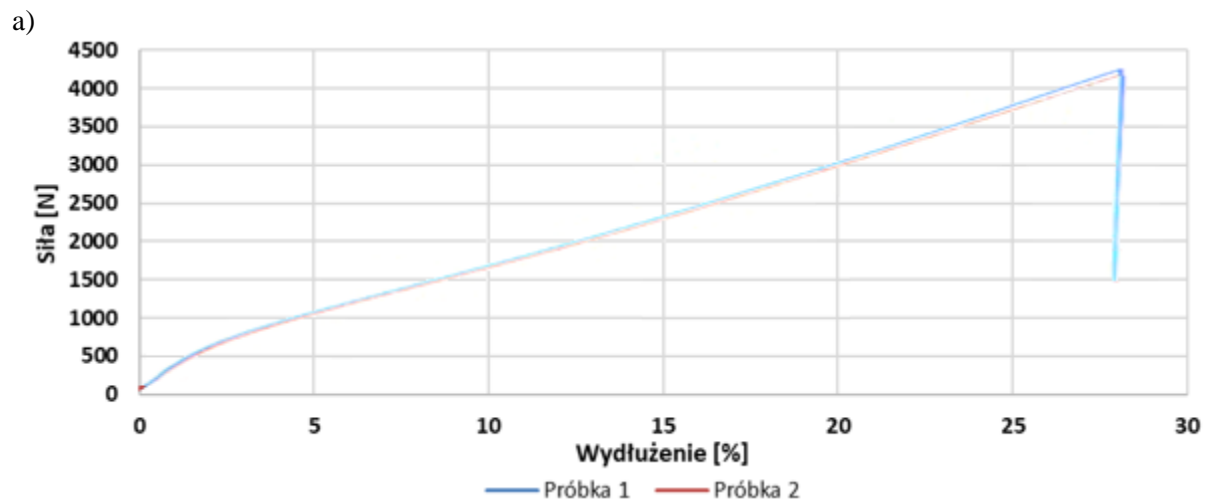
b)



Rys. 5.140. Wyniki statycznego rozciągania, uszkodzenie UP I_{POPRZ}.

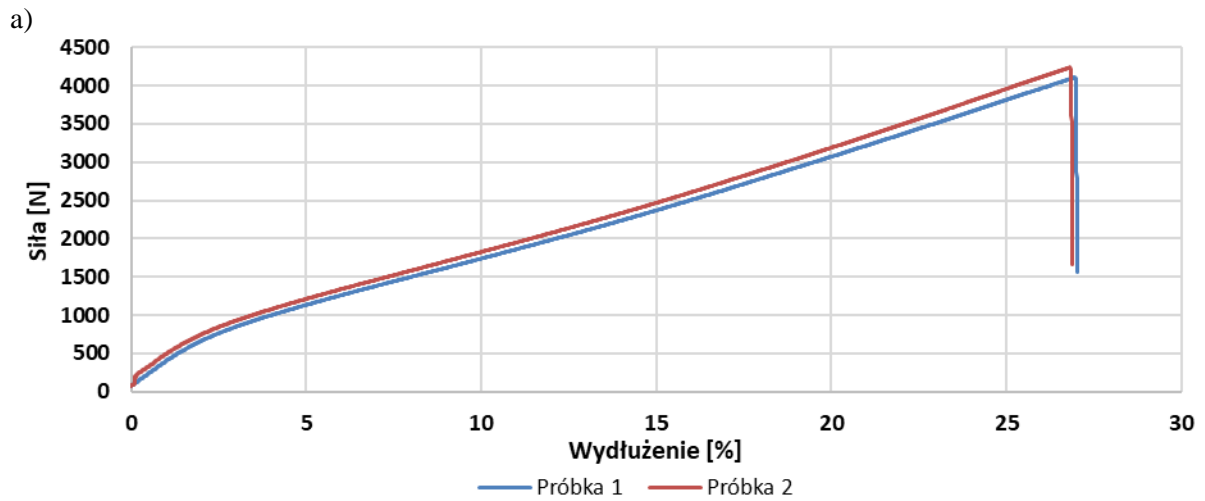
a) wykres, b) zdjęcia próbek po zerwaniu (Ryba i in., 2024)

Wyniki próby statycznego rozciągania pokazane na rysunkach 5.141 a i b przedstawiają dwie próbki z zadaniem uszkodzeniem w formie przecięcia wzdłużnego taśmy o długości 50 mm, znajdującego się w widocznym na rysunku 5.141b przewężeniu. W przypadku tego typu uszkodzenia zadane przecięcie spowodowało propagację przecięcia oraz osłabienie przekroju aż do momentu zerwania próbki.



Rys. 5.141. Wyniki statycznego rozciągania, uszkodzenie UW I
a) wykres, b) zdjęcia próbek po zerwaniu (Ryba i in., 2024)

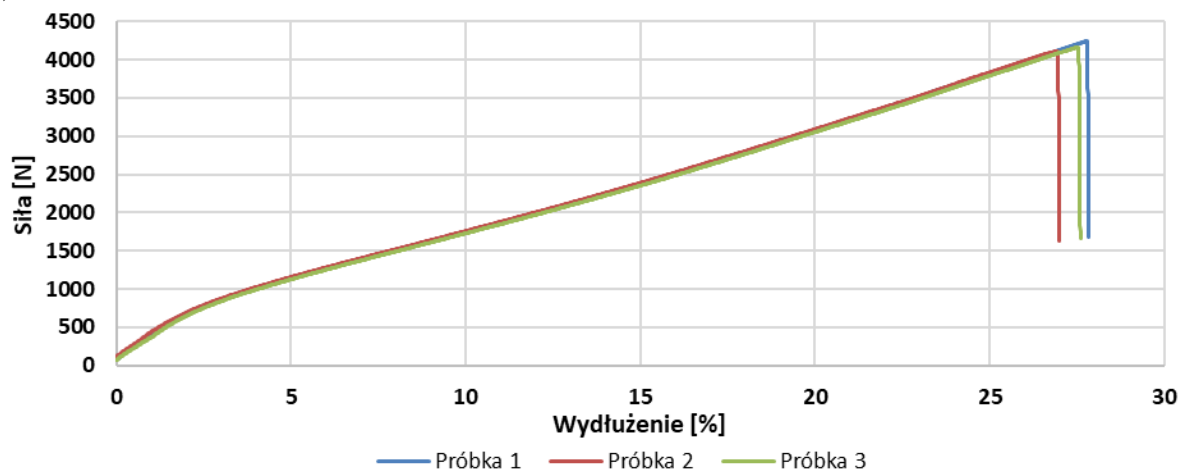
Wyniki próby statycznego rozciągania pokazane na rysunkach 5.142 a i b przedstawiają dwie próbki z zadaniem uszkodzeniem w formie przecięcia wzdłużnego taśmy o długości 70 mm, znajdującego się w widocznym na rysunku 5.142b przewężeniu. W przypadku tego typu uszkodzenia zadane przecięcie spowodowało propagację przecięcia oraz osłabienie przekroju aż do momentu zerwania próbki.



Rys. 5.142. Wyniki statycznego rozciągania, uszkodzenie UW II
a) wykres, b) zdjęcia próbek po zerwaniu (oprac. własne)

Na rysunkach 5.143 a i b zostały przedstawione wyniki próby statycznego rozciągania trzech próbek z zadaniem uszkodzeniem w postaci nacięcia wzdłużnego o długości 45 mm o głębokości 1 mm umiejscowionego w przewężonej części próbki (5.143b). W przypadku tego typu uszkodzenia zadane nacięcie nie miało znaczącego wpływu na miejsce zerwania próbki.

a)

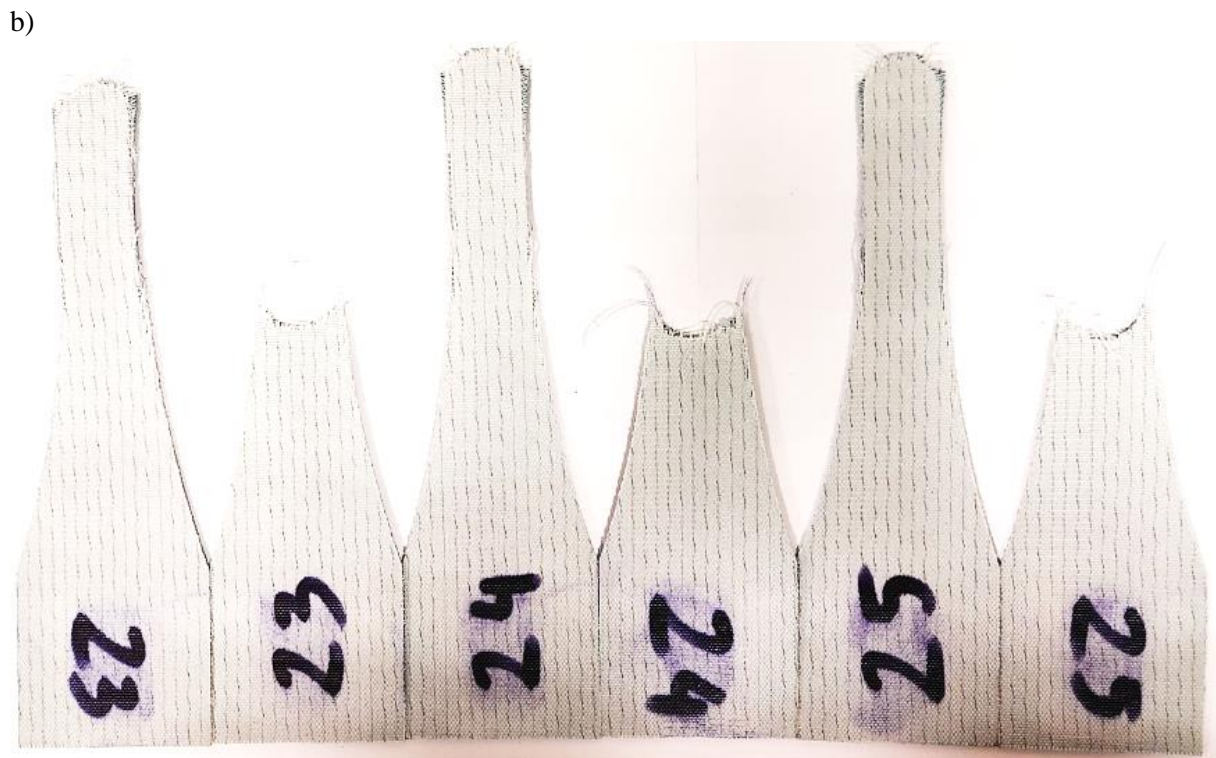
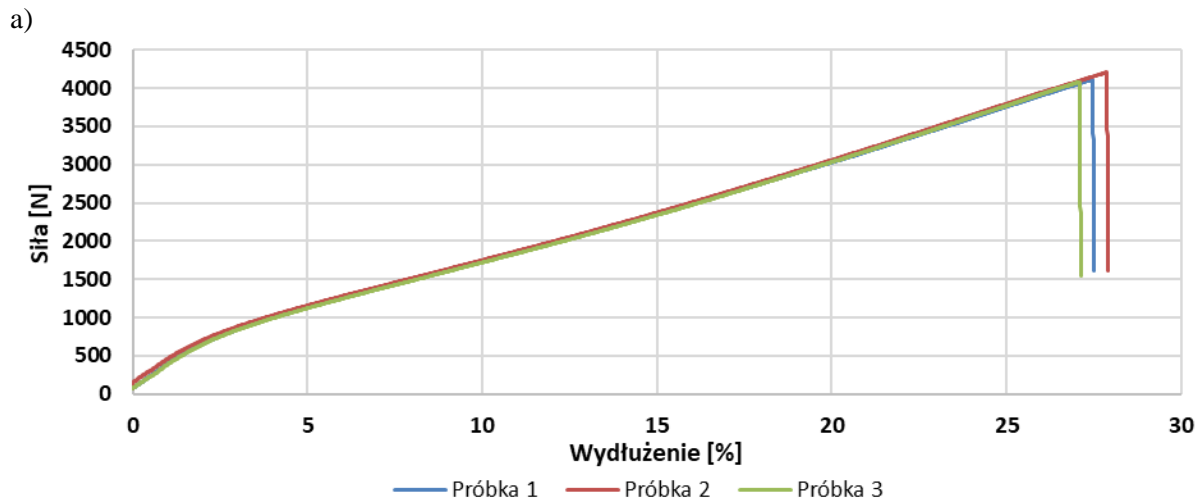


b)



Rys. 5.143. Wyniki statycznego rozciągania, uszkodzenie UW III
a) wykres, b) zdjęcia próbek po zerwaniu (oprac. własne)

Na rysunkach 5.144 a i b zostały przedstawione wyniki próby statycznego rozciągania trzech próbek z zadaniem uszkodzeniem w postaci nacięcia wzdłużnego o długości 50 mm i głębokości 1,5 mm, będącego w środkowej części przewężenia próbki pokazane na fotografii (rys. 5.144b). W przypadku tego typu wymuszonego karbu głębokość nacięcia spowodowało tylko częściowe uszkodzenie rdzenia, miejsce zerwania próbek wystąpiło poza obszarem uszkodzenia taśmy.



Rys. 5.144. Wyniki statycznego rozciągania, uszkodzenie UW IV
a) wykres, b) zdjęcia próbek po zerwaniu (oprac. własne)

W tabeli 5.49 zestawiono wartości otrzymane z pomiarów systemem tensometrycznym z wybranymi właściwościami mechanicznymi taśmy. Największa zarejestrowana wartość przez tensometr T1 o wartości 1747 ADU, oraz tensometr T3 1098 ADU, odpowiada uszkodzeniu wzdłużnemu UW IV. Wartości dla próby statycznego rozciągania próbki odzwierciedlającej ten rodzaj uszkodzenia to odkształcenie przy zerwaniu 27,5 % oraz wynoszące 82,6 MPa naprężenie zrywające. Wartości naprężenia zrywającego zarejestrowane podczas rozciągania pozostałych próbek zawierają się pomiędzy 31,1 MPa a 83,7 MPa, natomiast odkształcenia przy zerwaniu wynosiły od 9,8 % do 28,0 % .

Tab. 5.49. Wyniki pomiarów

Uszkodzenie	T 1 [ADU]	T 2 [ADU]	T 3 [ADU]	Największa siła rozciągająca F_m [N]	Odształcenie przy zerwaniu [%]	Naprężenie zrywające σ_B [MPa]
UW I	1210	243	946	4215,0	28,0	83,7
UW II	1210	541	962	4171,1	26,9	83,4
UW III	1257	527	964	4171,4	27,4	83,4
UW IV	1747	903	1098	4130,8	27,5	82,6
UPI	1195	2873	944	1554,6	9,8	31,1

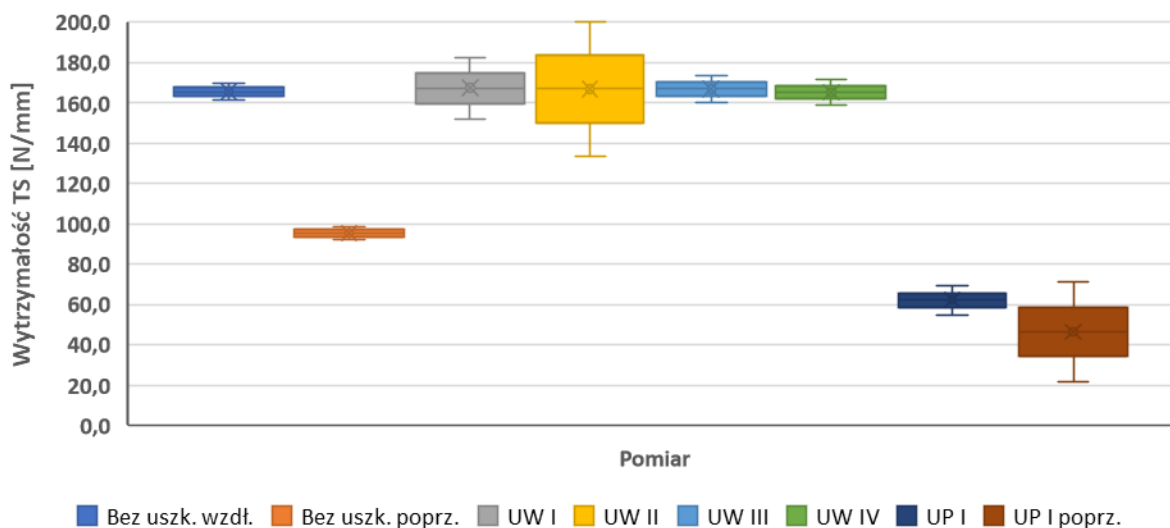
Wykonane uszkodzenia w postaci niepełnych oraz całkowitych przecięć powodują wzrost wartości naprężeń występujących na dnie karbu, gdzie osiągają swoje maksimum (Kocańda i Szala, 1997). Badania statycznego rozciągania próbek z zasymulowanymi uszkodzeniem, tylko w pewnej części dają obraz czy uszkodzenie możemy kwalifikować jako niezgodność lub wadę. Wynika to z charakteru uszkodzeń oraz kierunku rozciągania próbek taśmy. Rozciągany przekrój miał karb geometryczny, wykonany na środku przewężenia, co w przypadku próby rozciągania nie powodowało jednoznacznego osłabienia badanego przekroju na tyle, aby zawsze pękał w obszarze danego typu uszkodzenia.

**Rys. 5.145.** Zerwane próbki, typ uszkodzenia UW III (oprac. własne)

Na fotografii widocznej na rys. 5.145 zaprezentowano zerwane próbki z nieciągłością materiału o długości 45 mm – uszkodzeniu UW III. Próbka tylko w jednym przypadku uległa zerwaniu w bezpośrednim obszarze uprzedniego uszkodzenia, jednak układ tensometryczny umieszczony na bębnie zwrotnym jest w stanie bezpośrednio wykryć ten typ uszkodzenia. Takie uszkodzenie taśmy w warunkach transportu materiałów sypkich spowodowałoby wysypywanie się materiału pod powierzchnię taśmy, a większe obciążenie spowodowałoby dalszą propagację uszkodzenia, które w obecnym stanie tylko częściowo jest wykrywane w próbie statycznego rozciągania. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że badany innowacyjny system

pomiarowy daje informacje o wystąpieniu destrukcyjnych uszkodzeń, których pojawienie się będzie powodować dalszą propagację zniszczenia obszaru taśmy, aż do chwili jej zerwania.

Na wykresie 5.146 zostały zwizualizowane wyniki analizy statystycznej parametru siły zrywających (TS – ang. *Tensile Strength*), dla grubości taśmy 2 mm, natomiast wartości obliczeń zestawiono w tabeli 5.50. Dla założonego 95% przedziału ufności, który na wykresie pokazują pionowe słupki, obliczone zostały wartości odchyłek ośmiu grup próbek poddanych statycznemu zrywaniu.



Rys. 5.146. Analiza statystyczna TS (oprac. własne)

Tab. 5.50. Wyniki analizy statystycznej sił zrywających TS ($p = 0,95$)

Typ próbki	Bez uszk. wzdl.	Bez uszk. poprz.	UW I	UW II	UW III	UW IV	UP I	UP I poprz.
Dolna odchyłka [N/mm]	161,2	92,0	152,2	133,2	160,3	159,0	55,0	21,7
Wartość średnia TS [N/mm]	165,5	95,4	167,4	166,8	166,9	165,2	62,2	46,4
Górna odchyłka [N/mm]	169,9	98,8	182,6	200,5	173,4	171,5	69,4	71,1

Wartości TS dla próbek nieposiadających uszkodzeń rozciąganych wzdłuż kierunku włókien rdzenia (pierwsza kolumna tabeli 5.50) wyniosły $165,5 \pm 4,4$ N/mm oraz $95,4 \pm 3,4$ N/mm dla próbek rozciąganych poprzecznie do kierunku rdzenia (druga kolumna tabeli 5.49), wskazują na anizotropowe właściwości badanej taśmy, co szczegółowo zostało omówione w rozdziale 4.1. Kolejna grupa analizowanych próbek to te mające przecięcie (10 mm) na środku przewężenia próbki, również w tym przypadku rozciąganie było wykonywane wzdłużnie oraz poprzecznie do kierunku ułożenia włókien rdzenia. Otrzymane wyniki dla próbek z uszkodzeniem UP I wyniosły $62,2 \pm 7,2$ N/mm, natomiast dla próbki UP I poprz. $46,4 \pm 24,7$ N/mm. Wyniki potwierdzają zależności wytrzymałości taśmy od kierunku ułożenia włókien również dla próbek posiadających karb, natomiast w odniesieniu do nieuszkodzonych próbek których rozstęp średnich wartości siły zrywającej wynosił 70,1 N/mm, jest

znacznie mniejszy i wyniósł 15,8 N/mm. Kolejna grupa wyników to próbki rozciągane wzdłużnie do kierunku włókien rdzenia posiadające uszkodzenia wzdłużne (UW I – UW IV), rozstęp wartości średnich wyniósł 2,2 N/mm, jest to istotnie mniejsza wartość w porównaniu do grupy próbek nieuszkodzonych oraz grupy próbek z uszkodzeniami typu UP. Na podstawie przedstawionych wyników należy wnioskować, że próbki bez uszkodzeń oraz z uszkodzeniami typu UW rozciągane wzdłużnie do kierunku włókien rdzenia mają tylko nieznaczne różnice wartości średnich TS, rozstęp wyniósł 2,2 N/mm, a wartość średnia próbek bez uszkodzeń 165,5 N/mm mieści się w rozstępie próbek UW.

5.3. Ocena możliwości zastosowania sztucznej inteligencji do analizy pozyskanego sygnału

Zgodnie z postawionymi celami badawczymi, dokonano próby obróbki i interpretacji pozyskiwanego sygnału za pomocą sztucznej inteligencji. W ramach rozwoju koncepcji *Industry 4.0* sztuczna inteligencja (ang. *artificial intelligence*, AI) i uczenie maszynowe (ang. *machine learning*, ML) coraz częściej znajduje zastosowanie w procesach produkcyjnych, włącznie z łańcuchem dostaw i transportu (Mypati i in., 2023). Ciągle wzrasta też zastosowanie AI w urządzeniach pomiarowych i w pomiarze jako takim (ang. *measurement itself*, I&M) (Wieczorowski i in., 2023), a także w systemach monitorowania zużycia w czasie rzeczywistym, np. narzędzi skrawających (Zuperl i in., 2022). Pojawiają się też publikacje, dotyczące wykorzystania pomiarów i algorytmów maszynowego uczenia do zapobiegania awariom przenośników taśmowych (Rumin i in. 2023) oraz monitorowania ich pracy (Zhang i in., 2023). W zarządzaniu łańcuchami dostaw magazynowanie i transport (w tym transport bliski) stanowią główne składowe, zapewniające bezpieczeństwo i ciągłość produkcji oraz terminowość dostaw wyrobów do klienta. Gromadzenie i obróbka jak największej ilości danych o wszystkich procesach, umożliwiającą podejmowanie odpowiednich decyzji bazujących na wiedzy, odbywa się za pomocą AI oraz ML.

Jak już odnotowano przy omówieniu systemów monitorujących pracę przenośników taśmowych (rozdz. 3.4), zbieranie sygnałów pomiarowych w czasie rzeczywistym wymaga obróbki dużej ilości danych. System detekcji można podzielić na dwie główne części składowe (Zhang i in., 2021):

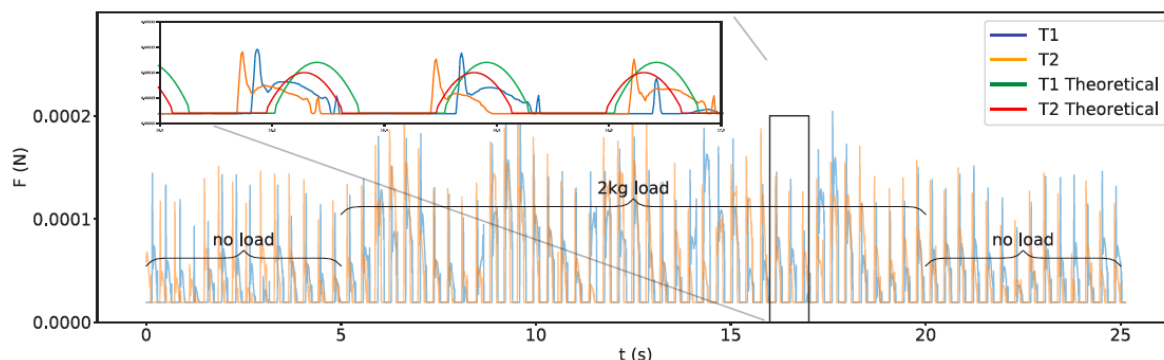
- sieć główna odpowiadająca za wyodrębnienie badanej cechy (ang. *feature extraction network*),
- sieć odpowiadająca za prognozowanie rozwoju uszkodzeń i przewidywanie awarii (ang. *prediction network*).

Do analizy i przewidywania uszkodzeń taśmy przenośnika wykorzystuje się też wirtualną rzeczywistość (ang. *virtual reality*, VR). Zastosowanie VR jest pomocne również w nauczaniu osób obsługujących przenośniki, zwiększając bezpieczeństwo oraz ulepszając jakość obsługi serwisowej (Fedorko, 2021). Wykorzystanie metodyki „dystylacji wiedzy połączonej” (ang. *Fusion knowledge distillation*), opisanej przez Guo i in. (2023), pozwala na identyfikację uszkodzeń z dokładnością 92,53% w czasie rzeczywistym podczas analizy 65 zdjęć na sekundę.

5.3.1. Taśma obciążona

W ramach niniejszej rozprawy podjęto wstępną próbę wykorzystania maszynowego uczenia do identyfikacji obciążenia, znajdującego się na taśmie przenośnika, na podstawie sygnałów z czujników tensometrycznych. Badania wykonano we współpracy z zespołem naukowców z Politechniki Wileńskiej (Vilnius Gedyminas Technical University) (Zvirblis i in., 2022). Przebieg

zmian sygnałów z dwóch tensometrów w czasie 25 s jest pokazany na rys. 5.147. Po 5 sekundach na taśmie został umieszczony ładunek o masie 2 kg, który w ciągu 15 s przesunął się na koniec badanego odcinka taśmy. Można zauważyć, że impulsy pomiarowe, pozyskiwane z czujników T1 i T2 są nieczytelne z punktu widzenia oceny wizualnej i wymagają dodatkowej obróbki w celu wyodrębnienia użytecznej informacji.



Rys. 5.147. Zarejestrowany sygnał z dwóch tensometrów w ciągu 25 s (Zvirblis i in., 2022)

Pomiary wykonano dla taśmy nieobciążonej oraz obciążonej przy prędkości posuwu od 0,5 do 1,7 m/s. Przy częstotliwości próbkowania 200 Hz jeden obrót wałka i odpowiedni cykl pomiarowy umieszczonego na nim tensometru odpowiadała 140 próbkom dla najniższej badanej prędkości 0.5 m/s, zaś dla najwyższej prędkości 1.7 m/s było to 45 próbek.

Wstępne testy obejmowały pięć metod uczenia maszynowego, a mianowicie:

- regresja logistyczna (ang. *logistic regression*, LR), w której zamiast przewidywania zmiennej Y na podstawie zmiennych wejściowych (Xs), podaje się prawdopodobieństwo wystąpienia Y przy znanych wartościach zmiennych Xs , przy czym zazwyczaj mamy do czynienia z jedną zmienną zależną w sposób binarny i zbiorem zmiennych wejściowych dychotomicznych lub kwantytatywnych, albo też kombinowanych (Gifford i Bayrak, 2023);
- maszyna wektorów nośnych (ang. *support vector machine*, SVM), jeden z modeli uczenia się nadzorowanego (ang. *supervised learning*) identyfikujący i klasyfikujący próbki danych, który przypisuje nowy zestaw danych do jednej klasy (Gatera i in., 2023);
- losowy las (ang. *random forest*, RF), schemat klasyfikacji zespołowej, który wykorzystuje parametr większościowy do przewidywania klas na podstawie podziału danych z wielu drzew decyzyjnych. RF tworzy wiele drzew przypisując losowo określoną liczbę zmiennych do podziału w każdym węźle drzew decyzyjnych (Breiman, 2001);
- długa pamięć krótkoterminowa (ang. *long short-term memory*, LSTM), jeden z modeli uczenia maszynowego, w którym rzędy danych pozyskiwanych w czasie $X = (x_1, x_2, \dots, x_T)$ są powiązane z mechanizmem bramkowym i odnawianiem danych o stanie, który w LSTM opisuje ukryty wektor (c, h_t) (Goodfellow i in., 2016);
- oraz sieci neuronowe Transformer (ang. *Transformer neural network*, TNN), które obliczają reprezentację sekwencji, dopasowując każdą część sekwencji do pozostałych części tej samej sekwencji, co umożliwia jednoczesne przetwarzanie wszystkich części wejściowych, zwiększając prędkość treningu (Chabert i in., 2023).

W przeprowadzonych testach wykorzystano parametr trafności przewidywania A_c , określony jako stosunek liczby poprawnie dokonanego przewidywania N_c do liczby całkowitej wszystkich przewidywań N_T (Zvirblis i in., 2022):

$$A_c = N_c / N_T \quad (5.2)$$

Z całego zestawu zarejestrowanych przebiegów 80% wykorzystano do uczenia algorytmów LR, SVM i RF, a pozostałe 20% do sprawdzania ich efektywności. W przypadku LSTM i TNN wykorzystano część zestawów wyników do walidacji, tak że uczenie odbywało się na 70% zarejestrowanych przebiegów, walidacja na podstawie 10%, a sprawdzanie z wykorzystaniem tych samych 20% przebiegów, co w przypadku LR, SVM i RF.

Eksperymenty wykonano za pomocą Google Colaboratory Platform, wykorzystując GPU Tesla K80. Wyniki dla trafności przewidywania A_c są przedstawione w tabeli 5.51.

Tab. 5.51. Trafność przewidywania A_c , osiągnięta przez różne modele (Zvirblis i in., 2022)

Długość sygnału [s]	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	5,0
LR	57	61	65	69	72	76
SVM	58	62	66	71	74	76
A_c [%] RF	60	62	67	74	79	78
TNN	60	63	69	81	92	100
LSTM	72	77	98	100	100	100

Jak widać z tabeli 5.51, trafność klasyfikacji sygnału wzrasta dla wszystkich badanych modeli ML wraz z długością sygnału. W modelach LR, SVM i RF trafność A_c wzrastała o kolejne 4% po podwojeniu długości sygnału. Z tych trzech najwyższą dokładnością przewidywania wykazał się model RF, który osiągnął trafność A_c na poziomie 78-79% dla sygnałów 3,2-5,0 (o 2-7% lepiej niż LR i SVM). Zresztą model RF we wszystkich przypadkach miał najwyższą trafność klasyfikowania, za wyjątkiem długości sygnału 0,4 s, przy której A_c dla SVM miało taką samą wartość 62%. Uogólniając, można zapisać, że trafność dla pierwszych trzech modeli szereguje się następująco (Zvirblis i in., 2022):

$$A_c(\text{LR}) \leq A_c(\text{SVM}) \leq A_c(\text{RF}). \quad (5.3)$$

Ta zależność pozostaje prawdziwa dla każdej długości analizowanego sygnału. Należy przy tym odnotować, że model LSTM osiągnął trafność przewidywania 77% przy długości sygnału 0,4 s, zaś modele SVM i LR osiągały takie same wartości A_c przy sygnale ponad 10 razy dłuższym. Z badanych pięciu modeli jedynie TNN i LSTM osiągnęły $A_c = 100\%$ przy długościach 5,0 i 1,6 s, odpowiednio. Ten trend pozostał bez zmian również dla innych parametrów dokładności identyfikowania sygnałów, zarówno dla obciążonej taśmy, jak i dla biegu bez obciążenia (Zvirblis i in., 2022). Wszystkie wyniki badań zostały umieszczone w bazie danych CORBEL (ang. *Conveyor belt pressure signal dataset*) i udostępnione w otwartym dostępie na platformie GitHub <https://github.com/TadasZvirblis/CORBEL>.

Wstępna analiza możliwości zastosowania algorytmów uczenia maszynowego wskazuje na istnienie identyfikowalnych powiązań między stanem obciążonej taśmy przenośnikowej a przebiegiem sygnału, rejestrowanego przez tensometry. Stanowi to dowód poprawności postawionej tezy pomocniczej, dotyczącej monitorowania w czasie rzeczywistym siłę nacisku taśmy na bęben. Dalsze badania pozwolą nie tylko wyodrębnić lepsze modele uczenia maszynowego, ale też poszerzyć bazę danych o kolejne wyniki.

5.3.2. Taśma uszkodzona

Oprócz monitorowania pracy taśmy z obciążeniem, konieczne jest wczesne wykrywanie uszkodzeń. Metody diagnozowania są poszukiwane i rozwijane, a ich celem jest wykrywanie awarii na wczesnym etapie ich powstawania. Do diagnozowania urządzeń można wykorzystać m.in. statystyczne metody kontroli oparte na danych pomiarowych. Algorytmy uczenia maszynowego są wykorzystywane przy wyznaczaniu charakterystyk i klasyfikacji dla sygnału dynamicznego, która może być przeprowadzona za pomocą jednej z metod uczenia maszynowego, np. KNN lub SVM (Komorska i in., 2021). W ramach niniejszej rozprawy, wykorzystując dane z czujników tensometrycznych, rozpoznano możliwości uczenia maszynowego w zadaniu klasyfikacji stanu taśmy przenośnikowej. Dla prędkości $n_1=159$ obr/min zostały wyodrębnione sygnały o długości 9,5 sekundy, odpowiadające pełnemu cyklowi przejścia taśmy. Analizie statystycznej poddano sygnały dla taśmy bez uszkodzeń, z trzema uszkodzeniami oraz z pięcioma uszkodzeniami. W tabeli przedstawiono wartości 18 predyktorów dla dwudziestu danych statystycznych z trzech tensometrów T1, T2 i T3 oraz każdego z trzech stanów taśmy. Obliczono wartość średnią (oznaczoną w Tabeli 5.52 jako „Średnia”) wartość średniokwadratową (oznaczoną „Rms”), wartości minimalną i maksymalną oraz odchylenie standardowe i kurtozę dla danych z każdego tensometru.

Wartość średnia:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|, \quad (5.4)$$

gdzie: $x(n)$ – amplituda kolejnej próbki, N – liczba próbek.

Wartość średniokwadratowa Rms:

$$\text{Rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2}. \quad (5.5)$$

Odchylenie standardowe:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - \bar{X}]^2}. \quad (5.6)$$

Kurtoza:

$$\text{Kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{X})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{X})^2\right)^2}. \quad (5.7)$$

Dla trzech identyfikowanych stanów taśmy przenośnikowej użyto łącznie 360 pojedynczych danych statystycznych.

Tab. 5.52. Cechy sygnałów

POMIAR	1	..	19	20	1	..	19	20	1	..	19	20
Stan	dobry	..	dobry	dobry	3 uszk.	..	3 uszk.	3 uszk.	5 uszk.	..	5 uszk.	5 uszk.
T1 Średnia	862,6	..	831,3	765,2	1044,6	..	959,3	1021,4	1440,3	..	1331,3	1419,4
T2 Średnia	406,3	..	317,5	316,2	442,1	..	385,3	430,0	668,1	..	580,9	668,3
T3 Średnia	735,9	..	750,3	761,4	787,6	..	751,5	773,8	856,0	..	843,7	863,4
T1 Min	569	..	520	487	619	..	637	642	828	..	799	848
T2 Min	223	..	213	222	221	..	193	144	247	..	239	209
T3 Min	580	..	602	615	660	..	625	642	670	..	592	671

Tab. 5.52. Cechy sygnałów c.d.

POMIAR	1	..	19	20	1	..	19	20	1	..	19	20
Stan	dobry	..	dobry	dobry	3 uszk.	..	3 uszk.	3 uszk.	5 uszk.	..	5 uszk.	5 uszk.
T1 Max	1330	..	1298	1376	2209	..	1553	1907	2987	..	2306	2505
T2 Max	845	..	519	538	1301	..	1119	1087	3429	..	3052	3073
T3 Max	1136	..	1066	1140	1030	..	1069	1081	1322	..	1337	1371
T1 Rms	876,4	..	772,9	555,9	923,7	..	932,2	835,4	1460,1	..	1294,9	1423,5
T2 Rms	414,7	..	293,6	226,0	411,7	..	391,8	368,7	784,7	..	629,3	755,8
T3 Rms	744,8	..	690,8	543,6	679,5	..	725,3	626,1	850,0	..	815,0	860,8
T1 σ	155,0	..	160,4	182,3	253,7	..	154,2	192,6	361,1	..	253,5	275,3
T2 σ	82,9	..	51,1	47,5	184,8	..	135,5	159,8	436,5	..	310,5	377,9
T1 σ	114,6	..	98,6	109,0	70,7	..	82,3	89,8	120,5	..	125,2	137,7
T1 Kurtoza	-0,5	..	-0,7	-0,1	4,3	..	1,0	2,5	2,2	..	1,9	0,3
T2 Kurtoza	3,6	..	0,6	2,3	3,3	..	5,4	1,5	13,2	..	18,3	10,2
T3 Kurtoza	0,1	..	0,1	0,5	0,4	..	1,0	0,8	1,2	..	0,4	0,1

Obliczone dane zostały zaimportowane do środowiska MatLab i przy pomocy aplikacji *Classification Lerner* zostały poddane dalszej analizie z zastosowaniem 32 algorytmów, dla parametru walidacji krzyżowej $k_w = 5$. Parametr walidacji k_w został dobrany z przedziału 3-10, w którym mniejszą wartość stosuje się dla dużych zbiorów. W wyniku analizy uzyskano dla siedmiu modeli dokładność identyfikacji na poziomie 100%, a dla kolejnych 12 modeli uzyskano wartość 98,33% błędnie klasyfikując tylko jeden przypadek. W tabeli 5.53 przedstawiono zestawienie wszystkich modeli, które wykorzystano w analizie, a także wyszczególniono procentową dokładność identyfikacji oraz liczbę błędnie klasyfikowanych przypadków.

Tab. 5.53. Zestawienie wyników dla różnych modeli

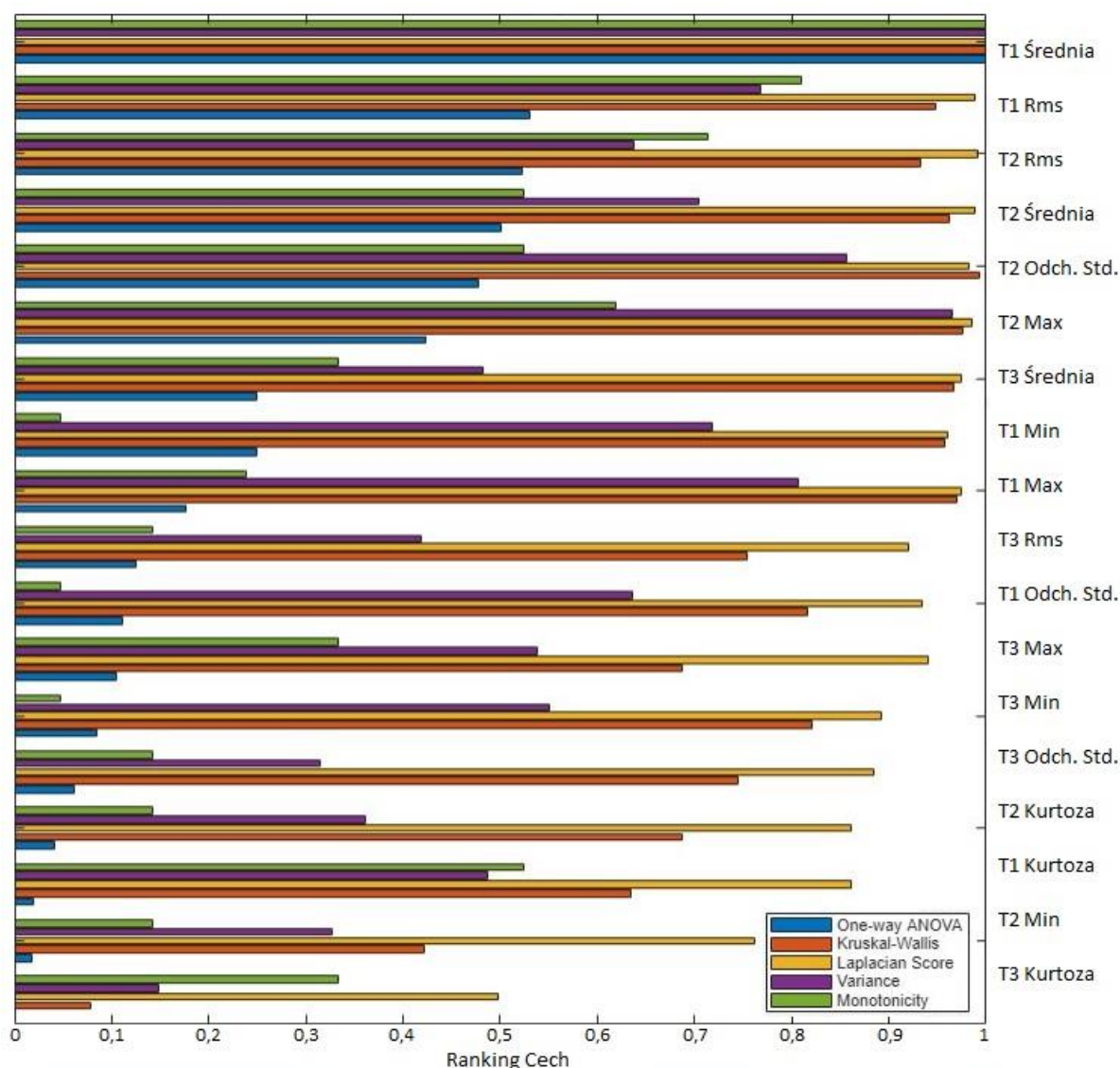
Model	Dokładność identyfikacji	Liczba błędnie sklasyfikowanych przypadków
<i>Fine Tree</i>	100,00 %	0
<i>Medium Tree</i>	100,00 %	0
<i>Coarse Tree</i>	100,00 %	0
<i>Quadratic SVM</i>	100,00 %	0
<i>Cubic SVM</i>	100,00 %	0
<i>Ensemble bagged trees</i>	100,00 %	0
<i>Ensemble subspace discriminant</i>	100,00 %	0
<i>Linear SVM</i>	98,33 %	1
<i>Medium Gaussian SVM</i>	98,33 %	1
<i>Fine KNN</i>	98,33 %	1
<i>Medium KNN</i>	98,33 %	1
<i>Cubic KNN</i>	98,33 %	1
<i>Weighted KNN</i>	98,33 %	1
<i>Ensemble Subspace KNN</i>	98,33 %	1

Tab. 5.53. Zestawienie wyników dla różnych modeli c.d.

Model	Dokładność identyfikacji	Liczba błędnie sklasyfikowanych przypadków
<i>Wide Neural Network</i>	98,33 %	1
<i>Bailayered Neural Network</i>	98,33 %	1
<i>Trilayered Neural Network</i>	98,33 %	1
<i>SVM Kernel</i>	98,33 %	1
<i>Logistic Regression Kernel</i>	98,33 %	1
<i>Linear Discriminant</i>	96,67 %	2
<i>Gaussian Naive Bayes</i>	96,67 %	2
<i>Coarse Gaussian SVM</i>	96,67 %	2
<i>Efficient Linear SVM</i>	95,00 %	3
<i>Narrow Neural Network</i>	95,00 %	3
<i>Medium Neural Network</i>	95,00 %	3
<i>Efficient Logistic Regression</i>	91,67 %	5
<i>Cosine KNN</i>	90,00 %	6
<i>Kernel Naive Bayes</i>	88,33 %	7
<i>Fine Gaussian SVM</i>	70,00 %	18
<i>Coarse KNN</i>	33,33 %	40
<i>Ensemble Boosted Trees</i>	33,33 %	40
<i>Ensemble RUSBoosted trees</i>	33,33 %	40

Następnie została przeprowadzona analiza 18 cech przy pomocy aplikacji *Diagnostic Feature Designer*, w celu sprawdzenia, które z cech mają największe znaczenia podczas uczenia maszynowego. W tym celu wykorzystano pięć modeli, takich jak: jednoczynnikowa analiza wariancji ANOVA, test Kruskala-Wallisasa, wynik Laplaciana, Wariancja oraz Monotoniczność. Wyniki przedstawiono graficznie na rys 5.148, gdzie cechy zostały uszeregowane malejąco według jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA. Test jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA jest testem parametrycznym, wymagającym założeń normalności rozkładu, jak również jednorodności wariancji w każdej grupie (Sandurska i in., 2016). Testuje wpływ jednego czynnika klasyfikacyjnego na wyniki wykonanego badania. Zakłada obecność jednej zmiennej niezależnej, którą stanowią badane grupy podczas eksperymentu, oraz jednej zmiennej zależnej, którą są wyniki badania. Podczas stosowania analizy wariancji tego typu, sprawdza się hipotezy dotyczące równości średnich, jeżeli analizowanych grup jest więcej niż dwie (Nowakowski, 2019). Gdy założenia testu nie zostają spełnione, wynik może być zafałszowany ze względu na zachwianą pierwotną konstrukcję testu. Transformacja danych przy pomocy przekształceń jest metodą, którą umożliwia znormalizowanie danych oraz ustabilizowanie wariancji. Gdy takie działania nie przynoszą pozytywnego rezultatu, alternatywą stają się testy nieparametryczne, np. Kruskala-Wallisasa będący odpowiednikiem jednoczynnikowej analizy wariancji (Sandurska i in., 2016). Nieparametryczny test Kruskala-Wallisasa jest odpowiednikiem parametrycznego testu jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA, pozwala na przeprowadzenie testów *post-hoc*, dla przypadku odrzucenia zerowej hipotezy o równości średnich w analizowanych grupach. Nie wymaga wstępnych założeń, można go stosować dla danych jakościowych oraz porządkowych, również dla małych grup. Siła testów parametrycznych jest

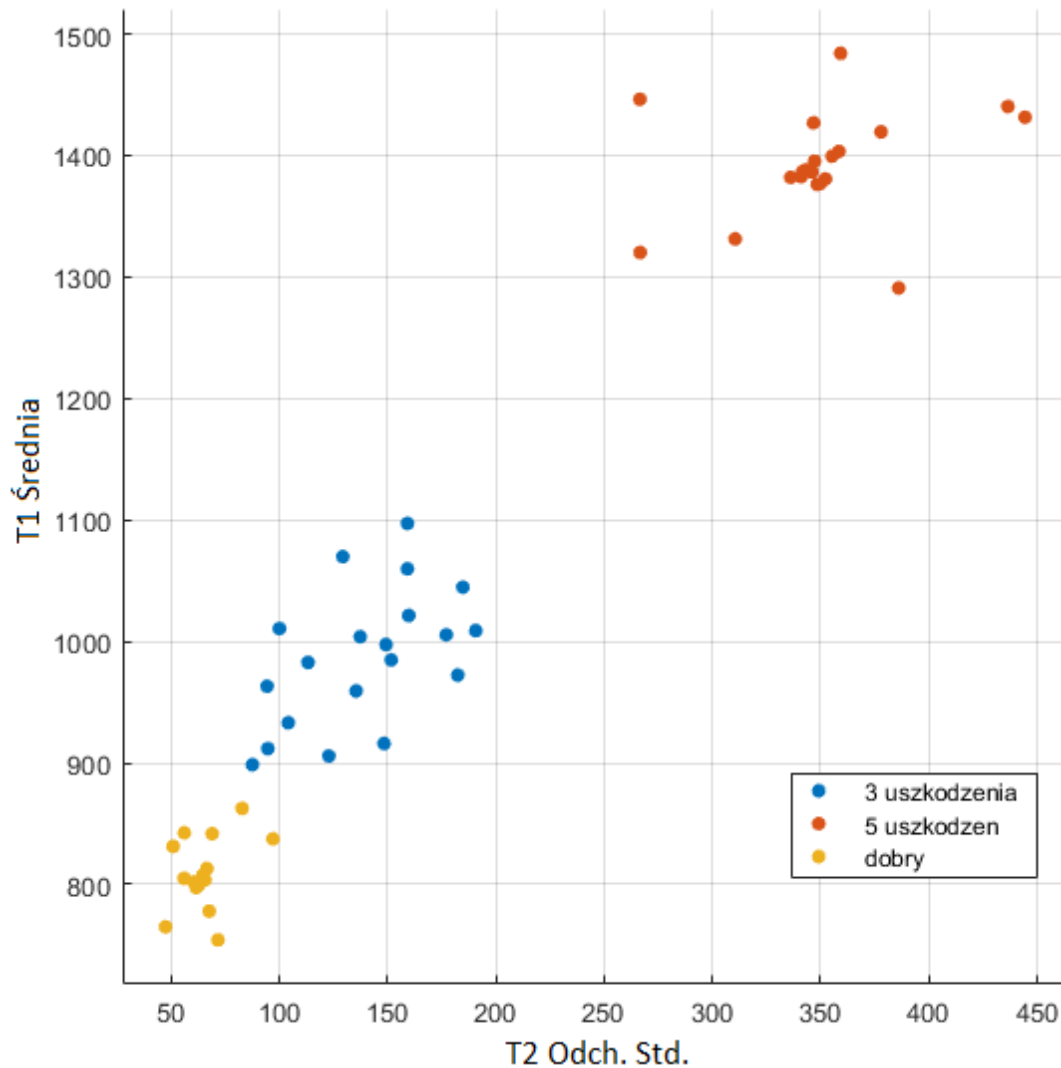
większa niż siła testów nieparametrycznych, dlatego należy je najpierw stosować, natomiast używać nieparametrycznych, gdy nie można zastosować testu parametrycznego (Sandurska i in., 2016).



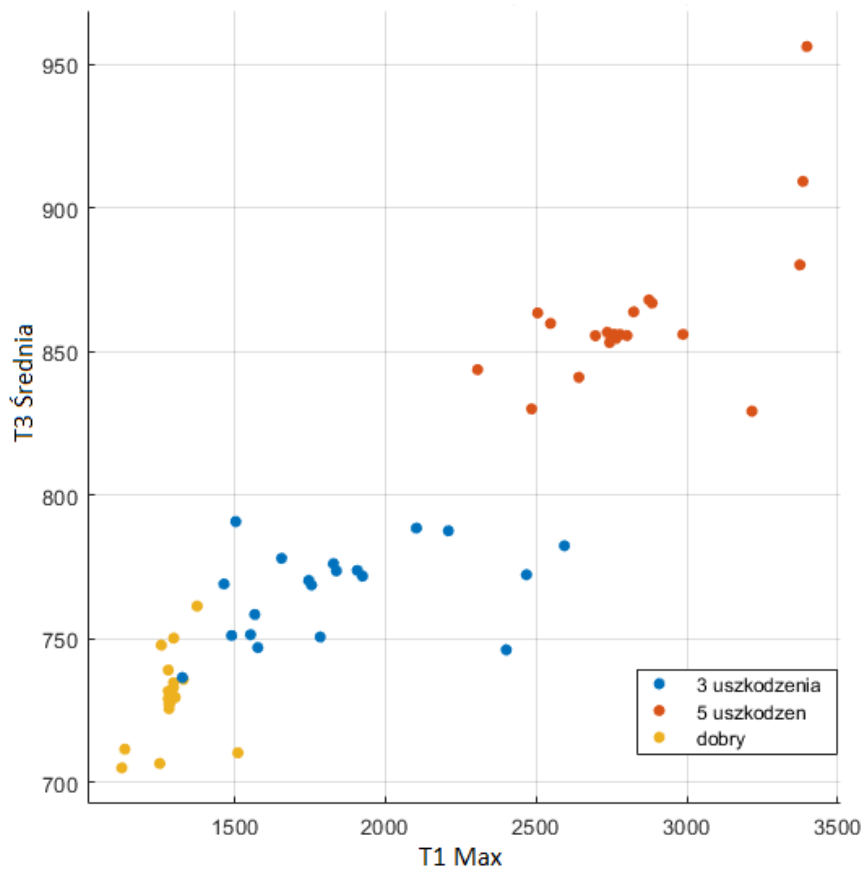
Rys. 5.148. Ranking cech statystycznych (oprac. własne)

Zasadniczą ideą metody wyniku Laplaciana (ang. *Laplacian score*) jest ocena cech zgodnie z ich siłą zachowania lokalizacji. Wynik Laplaciana opiera się na obserwacji, w której dwa punkty danych są prawdopodobnie powiązane z tym samym tematem, jeśli znajdują się blisko siebie. W zagadnieniach uczenia się, takich jak klasyfikacja, lokalna struktura przestrzeni danych ma większą wagę niż struktura globalna (He i in., 2005). Metoda Laplaciana wykorzystuje graf najbliższego sąsiada do uzyskania lokalnej struktury danych oraz uzyskuje wartość wyniku Laplaciana dla każdej z cech. Wybierane są cechy, które posiadają wyższe wartości punktacji Laplaciana. Wynik Laplaciana obiektu wskazuje na jego znaczenie dla zachowania lokalizacji (Chandra, 2016). Wariancja jest klasyczną miarą zróżnicowania, służącą do oceny zróżnicowania zbiorowości i nie ma interpretacji statystycznej. Znajduje zastosowanie w budowie innych parametrów np. momentów centralnych lub odchylenia standardowego. Wyrażana jest jako średnia arytmetyczna kwadratów odchyleń poszczególnych wartości cechy jednostek zbiorowości od ich średniej arytmetycznej (Ręklewski, 2020). Monotoniczność jest metoda rankingowa podająca wartości od 0 do 1, charakteryzując trend danej funkcji w miarę ewolucji systemu (*Diagnostic Feature Designer*, 2024).

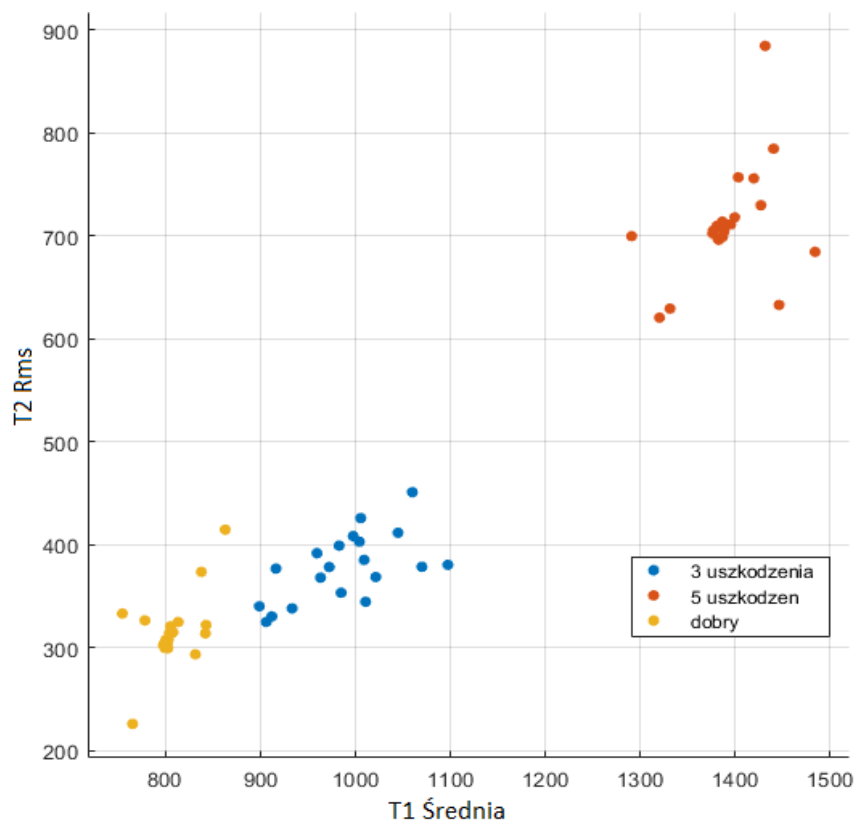
Analizując wartości rankingu cech można zauważyć, że wartość średnia dla sygnału z tensometru T1 w każdym z pięciu przypadków ma największe znaczenie. Analiza danych, przeprowadzona za pomocą czterech modeli, wykazuje najmniejsze znaczenie, występujące podczas identyfikacji stanu taśmy przesyłkowej przy pomocy kurtozy dla tensometru T3. Wykresy rozrzutu (rys. 5.149-5.151) przedstawiają dwie cechy o wysokiej istotności wg rys. 5.148, takich jak wartość średnia dla tensometru T1 oraz wartość średniokwadratowa dla tensometru T2, a także odchylenie standardowe dla tensometru T2 i wartość maksymalną dla tensometru T1. W każdym z zaprezentowanych wykresów rozrzutu są wyraźnie wyodrębnione i rozpoznane obszary skupień analizowanych punktów, na podstawie których został zidentyfikowany jeden ze stanów taśmy przesyłkowej.



Rys. 5.149. Wykres rozrzutu dla wartości średniej T1 i odchylenia standardowego T2 (oprac. własne)

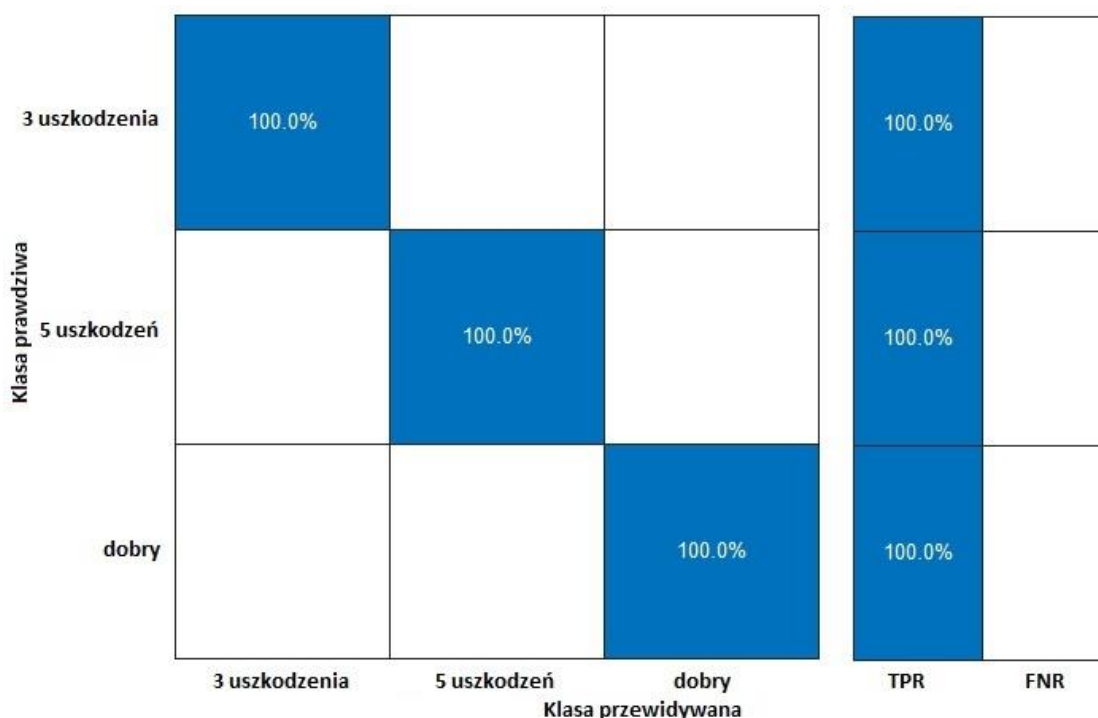


Rys. 5.150. Wykres rozrzutu dla wartości średniej T3 i wartości maksymalnej T1 (oprac. własne)



Rys. 5.151. Wykres rozrzutu dla wartości średniokwadratowej Rms T2 i średniej T1 (oprac. własne)

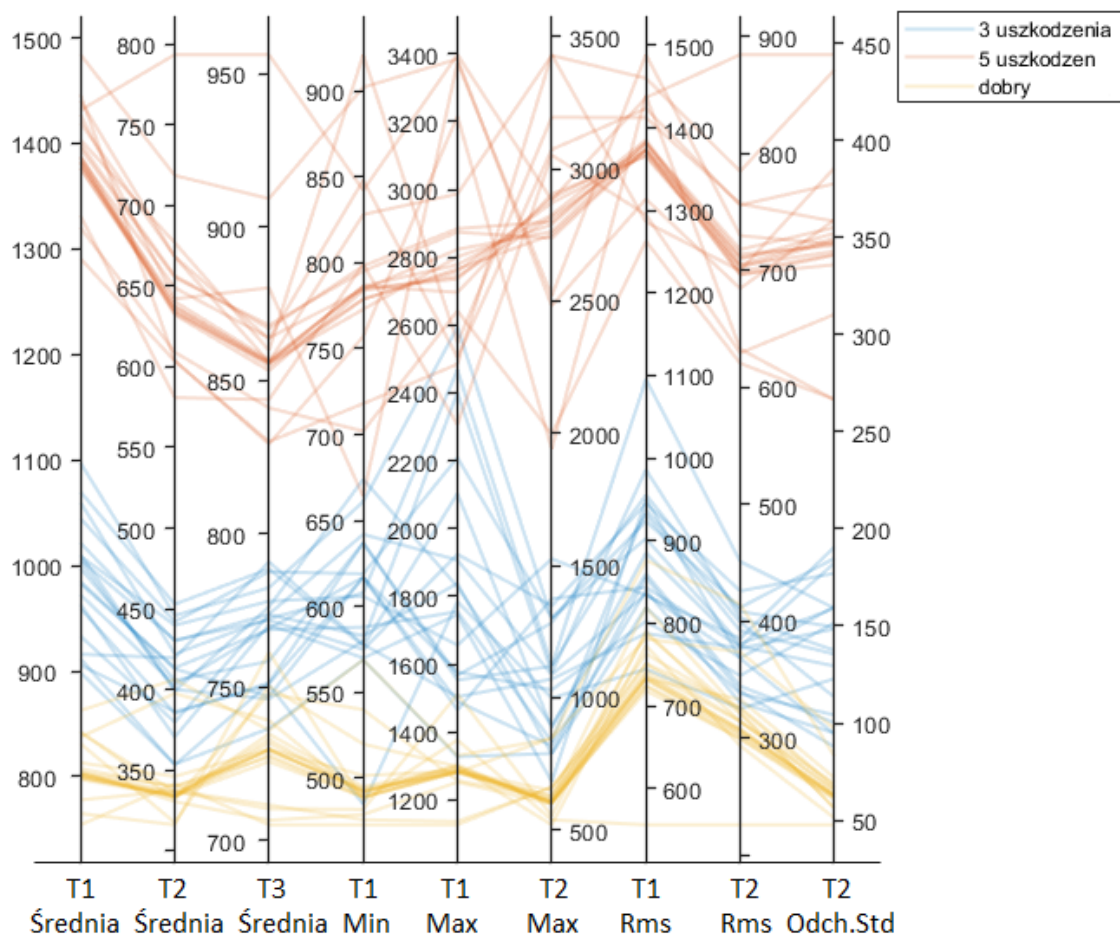
Macierz konfuzji, wykonana dla siedmiu modeli i pokazana na rys. 5.152, wskazuje na 100% poprawność kwalifikacji obserwacji. W macierzy konfuzji kolumny odpowiadają przewidywanej klasie, natomiast wiersze reprezentują klasę prawdziwą. Dla walidacji krzyżowej, macierz konfuzji jest obliczana przy użyciu przewidywań dla obserwacji walidacyjnych.



Rys. 5.152. Macierz konfuzji dla modeli, które uzyskały dokładność identyfikacji 100% (oprac. własne)

Komórki znajdujące się po przekątnej względem siebie pokazują, gdzie klasy prawdziwa i przewidywana są zgodne. W celu sprawdzenia działania klasyfikatora w poszczególnych klasach, wybrano funkcję pokazującą współczynniki wyników prawdziwie pozytywnych (TPR – odsetek poprawnie sklasyfikowanych obserwacji na prawdziwą klasę) oraz fałszywie negatywnych (FNR – odsetek nieprawidłowo sklasyfikowanych obserwacji na prawdziwą klasę). Przedstawiona macierz konfuzji potwierdza możliwość identyfikacji stanu taśmy przenośnikowej dla sygnałów pozyskanych z tensometrycznego systemu monitorującego podczas pracy przenośnika.

W celu porównania zmiennych i zobrazowania zachodzących między nimi relacji, został utworzony wykres współrzędnych równoległych (rys. 5.153), skorzystano ze skalowania typu *Range*. Oznacza to, że wyświetlone dane mają takie same limity minimalne oraz maksymalne. Na wykresie zostały pokazane przewidywania dla modelu typu *Cubic SVM* z wykorzystaniem dziewięciu cech o największej istotności.



Rys. 5.153. Wykres współrzędnych równoległych dla modelu *Cubic SVM* (oprac. własne)

Cechy o największej istotności wyszczególniono na podstawie rys. 5.148. Cechy te precyzyjnie uwidaczniają zakresy wartości dla trzech różnych stanów taśmy przesyłkowej. Kolorem czerwonym oznaczone są zmienne wskazujące taśmę z pięcioma uszkodzeniami, poza kilkunastoma wartościami można zauważyć jeden wyróżniający się obszar w górnej części wykresu. Wartości w środkowej części mają największy rozrzut i jest to obszar dla trzech uszkodzeń taśmy. Taśmę bez uszkodzeń charakteryzują zmienne w dolnej części wykresu, które są zaznaczone kolorem żółtym oraz posiadają najmniejszy rozrzut wartości. Analizując wykres można zauważyć trzy obszary odpowiadające stanom taśmy przesyłkowej, które tylko w niewielkim stopniu zachodzą na siebie.

Przedstawiona analiza możliwości zastosowania algorytmów uczenia maszynowego w zadaniu klasyfikacji stanu taśmy przesyłkowej wskazuje na istnienie identyfikowalnych powiązań między stanem taśmy przesyłkowej a przebiegiem sygnału, rejestrowanego przez tensometry. Stanowi to dowód poprawności postawionej tezy naukowej, dotyczącej wykorzystania systemu tensometrycznego do monitorowania pracy taśmy przesyłkowej w czasie rzeczywistym.

6. Podsumowanie i wnioski

Sformułowane w oparciu o tendencje do ciągłego doskonalenia systemów nadzorujących cele pracy, dotyczące opracowaniu i zbadania innowacyjnego systemu monitorującego stan taśmy przenośnika w czasie rzeczywistym, zostały osiągnięte. Urządzenie zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej (zgłoszenie patentowe nr P.447569). Na drodze opracowania innowacyjnego systemu monitorującego pracę taśmy przenośnika w czasie rzeczywistym i jego badań udowodniona została teza naukowa, dotycząca możliwości pozyskania informacji o prawidłowej pracy przenośnika oraz na wykrywanie uszkodzeń taśmy przenośnikowej. Wyniki badań pozwalają na sformułowanie szeregu wniosków, wskazujących na spełnienie przez system wysokich standardów stawianych przez założenia rozwojowej koncepcji *Przemysłu 4.0*. Niewątpliwymi zaletami opracowanego i zbadanego systemu są niewielkie koszty i łatwość wymiany zużytych lub uszkodzonych elementów tensometrycznych, ale przede wszystkim powtarzalność i identyfikowalność sygnałów monitorujących, co zdecydowanie zwiększa bezpieczeństwo pracy przenośnika i pozwala zapobiec awariom.

Tensometryczny system monitorujący umożliwia nadzorowanie stanu technicznego taśmy przenośnika w czasie rzeczywistym. W trakcie realizacji celów poznawczych w ramach sformułowanych tez pomocniczych stwierdzono, że system umożliwia wykrycie niezgodności typu zsuniecie taśmy lub jej przeciążenie, a także wad występujących na powierzchni lub w przekroju taśmy. Tym samym opracowane i zbadane urządzenie zalicza się do systemu eksperckiego pełniącego funkcję wczesnego ostrzegania. Będący obiektem badań system monitorujący umożliwia gromadzenie dużej ilości danych, przekazuje informację w czasie rzeczywistym oraz daje możliwość wykrycia potencjalnego uszkodzenia taśmy w trakcie eksploatacji przenośnika. To wszystko umożliwia wdrożenie strategii utrzymania ruchu i dalszą pełną automatyzację procesów transportu bliskiego.

W wyniku podjętych działań wszystkie postawione cele badawcze zostały w pełni osiągnięte. Na drodze badań empirycznych ustalono, że system pomiarowy oparty na tensometrach paskowych umożliwia monitorowanie stanu taśmy przenośnikowej w czasie rzeczywistym. Stwierdzono, że w przypadku stosowania tensometrów o średnicy 16 mm ciągłe monitorowanie stanu taśmy jest utrudnione, ponieważ sygnał informujący o stanie taśmy występuje tylko w zakresie 180° , gdy tensometr znajduje się bezpośrednio pod działaniem siły nacisku taśmy. Zmiana konstrukcyjna polegająca na zastosowaniu tensometrów paskowych umożliwiła otrzymywanie sygnału ciągłego, odpowiadającego pełnemu obrotowi bębna przenośnika, zapewniającego odczyt wartości nacisku taśmy w zakresie 360° obrotu bębna. W wyniku ciągłego monitorowania pracy taśmy przenośnikowej system umożliwia generowanie znacznej ilości danych, które można poddawać rozszerzonej analizie w oparciu o algorytmy uczące się. Wstępnie zbadano pięć algorytmów, z których dwa, mianowicie TNN oraz LSTM, osiągnęły trafność identyfikacji obciążenia na poziomie $A_c = 100\%$. Ponadto siedem modeli uczenia maszynowego wykazały zdolność 100% identyfikowania uszkodzeń taśmy.

Podczas realizacji celów badawczych na drodze empirycznej ustalono, że system pomiarowy, zbudowany w oparciu o tensometry opasające bęben przenośnika, umożliwia:

- monitorowanie naciągu taśmy w czasie rzeczywistym,
- wskazywanie wartości oraz miejsca położenia pojedynczego obciążenia na taśmie w trakcie pracy przenośnika,
- wykrywanie uszkodzeń w czasie rzeczywistym, zarówno nacięć typu powierzchniowego, jak i przecięć przenikających przez cały przekrój,

- możliwość zbierania i rejestrowania dużej ilości danych pomiarowych w czasie rzeczywistym w celu przeprowadzenia szczegółowej analizy,
- system zapewnia wysoką powtarzalność i dokładność pomiaru.

Należy podkreślić niewątpliwe zalety opracowanego systemu, które wskazują na zakres jego możliwego zastosowania:

- możliwość instalacji w już istniejących przenośnikach,
- monitorowanie i rejestracja stanu pracy taśmy w czasie rzeczywistym,
- możliwość pozyskania sygnału awaryjnego na wczesnym etapie powstawania zagrożenia,
- generowanie danych pozwalających na rozszerzoną analizę stanu technicznego taśmy,
- możliwość wykrywania uszkodzeń taśmy pojawiających się w trakcie eksploatacji,
- nieskomplikowaną konstrukcję,
- możliwość generowania sygnałów pomiarowych i ich bezprzewodowego przesyłania,
- wspomaganie szacowania terminu naprawy i wymiany taśm,
- możliwość wdrożenia przewidującej obsługi technicznej przenośników.

Do wniosków użytecznych można dodać następującą obserwację. W trakcie eksperymentów doszło do zablokowania przenośnika przez uszkodzoną taśmę, krótko po tym, jak sygnał o uszkodzeniu był zidentyfikowany. Dowodzi to przydatności systemu do obsługi przewidującej *predictive maintenance*, oraz zdolności zapobiegania awariom.

Osiągnięcie celów poznawczych i użytecznych, a także udowodnienie postawionej tezy naukowej otwiera szerokie perspektywy dla dalszych badań laboratoryjnych, budowy prototypów, a także testów w warunkach zbliżonych do przemysłowych. Planowane są następujące działania badawcze i rozwojowe:

- przeprowadzenie doświadczeń i analiz dla dynamicznych obciążeń, zbliżonych do sytuacji rzeczywistych w przemyśle, np. dla różnych ilości materiałów sypkich,
- zbudowanie nowego stanowiska w celu zbadania zachowania systemu przy różnych długościach taśmy,
- wykonanie analiz sygnałów pozyskiwanych dla różnych uszkodzeń różnego rodzaju, np. dłuższych rozcięć wzdłużnych czy wyrwań,
- przeprowadzenie eksperymentów i analiz wskazań tensometrów w czasie pracy obciążonej taśmy z uszkodzeniami różnego typu,
- wykorzystanie maszynowego uczenia do obróbki danych i utworzenie wystarczającej bazy przebiegów wzorcowych, którą można będzie wykorzystać przy wdrażaniu systemów tensometrycznych do transportu bliskiego w przemyśle.

Należy nadmienić, że ośrodki naukowe we Włoszech, w Serbii i na Litwie wyrażały zainteresowanie dalszą współpracą, m.in. w ramach wspólnego projektu międzynarodowego. Odbyły się pierwsze spotkania w celu utworzenia konsorcjum i rozpoczęto poszukiwanie odpowiedniego programu, w ramach którego można będzie złożyć wniosek o dofinansowanie dalszych badań.

7. Literatura

1. Antoniuk J., Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
2. *Badania ultradźwiękowe SONOTEC*, 2023 <https://www.sonotec.eu/en/products/non-destructive-testing/applications/mining/> (dostęp 12.09.2023).
3. Bajda M., Hardygóra M., Marasová D., Energy Efficiency of Conveyor Belts in Raw Materials Industry, *Energies*, 15, 2022, 1-6. <https://doi.org/10.3390/en15093080>
4. Błażej R., Jurdzia L., Kirjanów-Błażej A., Rzeszowska A., Olchówka D., Zastosowanie czujników i technik pomiarowych w ocenie stanu technicznego taśm przenośnikowych, *Kruszywa: produkcja – transport – zastosowanie*, ELAMED Media Group, 4, 2022, 38-43.
5. Błażej R., Jurdzia L., Zimroz R, Hardygora M., Kawal W., Investigations of Conveyor Belts Condition In The Institute of Mining Engineering At Wroclaw University of Technology. 23rd World Mining Congress – Mapping The Future: Advances in Mining Engineering, Montreal, August 2013.
6. Bortnowski P., Kawalec W., Król R., Ozdoba M., Types and causes of damage to the conveyor belt – Review, classification and mutual relations, *Engineering Failure Analysis*, 140, 2022, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106520>
7. Bortnowski P., Nowak-Szpak A., Ozdoba M., Król R., The Acoustic Camera as a Tool to Identify Belt Conveyor Noises, *Journal of Sustainable Mining*, 19(4), 2020, 286-295. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1036>
8. Breiman L., Random Forests, *Machine Learning*, 45, 2001, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
9. Bzinkowski D., Ryba T., Siemiatkowski Z., Rucki M., Real-time monitoring of the rubber belt tension in an industrial conveyor, *Reports in Mechanical Engineering*, 3(1), 2022, 1–10. <https://doi.org/10.31181/rme200103002b>
10. Chabert A., Bakkay M.C., Schweitzer P., Weber S., Andrea J., A Transformer Neural Network For AC series arc-fault detection, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 125, 2023, 106651. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106651>
11. Chamorro J., Vallejo L., Maynard C., Guevara S., Solorio A., Soto N., Singh K., Bhate U., Kumar R., Jose Garcia J., Newell B. Health monitoring of a conveyor belt system using machine vision and real-time sensor data, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 2022, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.03.013>.
12. Czabanowski R., *Sensory i systemy pomiarowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
13. Chandra B., Chapter 3 Gene Selection Methods for Microarray Data. In: D. Al-Jumeily, A. Hussain, C. Mallucci, C. Oliver (Eds.), *Applied Computing in Medicine and Health*. Morgan Kaufmann, Waltham 2016, 45-78
14. *Dane cyfrowe*, 2023, <https://homes.psd.uchicago.edu/~ejmartin/pix/20d/tests/noise/> (dostęp 12.09.2023).
15. *Dane z wypadków przy eksploatacji przenośników taśmowych w latach 2004-2014*, Wyższy Urząd Górniczy. https://www.wug.gov.pl/media/rzecznik_prasowy_informuje/idn:2117 (dostęp 12.09.2023).
16. Deputat J. *Badania ultradźwiękowe. Podstawy*. Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica, Gliwice 1980.

17. *Diagnostic Feature Designer, 2024*,
https://ch.mathworks.com/help/predmaint/ref/diagnosticfeaturedesigner-app.html#mw_40781341-dac4-40ff-b1ee-f05cef44eeb6 (dostęp 21.04.2023).
18. Dietrich E., Schultze A., *Measurement Process Qualification: Gauge acceptance and measurement uncertainty according to current standards*. Hanser, München 2011.
19. DIN EN ISO 527-1:2019 *Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 1: Zasady ogólne*.
20. Dobrotá D., *Vulcanization of Rubber Conveyor Belts with Metallic Insertion Using Ultrasounds*, *Procedia Engineering*, 100, 2015, 1160-1166.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.479>
21. Fayed M., Skocir T., *Mechanical Conveyors Selection and Operation*. Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster 1996.
22. Fedorko G., *Application possibilities of virtual reality in failure analysis of conveyor belts*, *Engineering Failure Analysis*, 128, 2021, 105615.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105615>
23. Fedorko G., Liptai P., Molnár V., *Proposal of the methodology for noise sources identification and analysis of continuous transport systems using an acoustic camera*, *Engineering Failure Analysis*, 83, 2018, 30-46. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.09.011>
24. Fedorko G., Molnár V., Ferková Z., Peterka P., Krešák J., Tomašková M., *Possibilities of failure analysis for steel cord conveyor belts using knowledge obtained from non-destructive testing of steel ropes*, *Engineering Failure Analysis*, 67, 2016, 33-45.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.026>
25. Florea V.A., Toderas M., Itu R.B., *Assessment Possibilities of the Quality of Mining Equipment and of the Parts Subjected to Intense Wear*, *Applied Science*, 13(6), 2023, 1-4.
<https://doi.org/10.3390/app13063740>
26. Furmanik K. *Transport Przenośnikowy*. AGH, Kraków 2008.
27. Gatera A., Kuradusenge M., Bajpai G., Mikeka Ch., Shrivastava S., *Comparison of random forest and support vector machine regression models for forecasting road accidents*, *Scientific African*, 21, 2023, e01739. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01739>
28. Gifford M., Bayrak T., *A predictive analytics model for forecasting outcomes in the National Football League games using decision tree and logistic regression*, *Decision Analytics Journal*, 8, 2023, 100296. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100296>
29. He X., Cai D., Niyogi P., *Laplacian Score for Feature Selection*, *Advances in Neural Information Processing Systems* 18, 2005, 507-514.
30. Gładysiewicz L., *Przenośniki taśmowe teoria i obliczenia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
31. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A., *Deep learning*, MIT Press, Cambridge, MA 2016.
32. Górecki A., Grzegórski Z., *Montaż, naprawa i eksploatacja maszyn i urządzeń przemysłowych*. WSiP, Warszawa 1998.
33. Gózdziecki M., Świątkiewicz H., *Przenośniki*. WNT, Warszawa 1979.
34. Guo X., Liu X., Gardoni P., Glowacz A., Królczyk G., Incecik A., Li Zh., *Machine vision based damage detection for conveyor belt safety using Fusion knowledge distillation*, *Alexandria Engineering Journal*, 71, 2023, 161-172. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.034>
35. Hardygóra M., Komander H., Bajda M., *Taśma przenośnikowa o zwiększonej odporności na uszkodzenia eksploatacyjne*, *CUPRUM Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud*, 1, 2011, 19-26.

36. Hardygóra M., Woźniak D. Europejski system oceny bezpieczeństwa stosowania taśm przenośnikowych w kopalniach podziemnych, CUPRUM Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud, 3, 2014, 57-68.
37. Hou C., Qiao T., Zhang H., Yusong Pang Y., Xiong X., Multispectral visual detection method for conveyor belt longitudinal tear, Measurement, 143, 2019, 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.010>
38. Hrabovský L., Blata J., Hrabec L., Fries J., The detection of forces acting on conveyor rollers of a laboratory device simulating the vertical section of a Sandwich Belt Conveyor, Measurement, 207, 2023, 112376. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112376>
39. Ilankovic N., Živanic D., Zuber N., The Influence of Fatigue Loading on the Durability of the Conveyor Belt, Applied Science, 13(5), 2023, 3277. <https://doi.org/10.3390/app13053277>
40. ISO 45001:2018 - System zarządzania Bezpieczeństwem i Higieną Pracy,
41. Jurdziak L., Błażej R., Burduk A., Bajda M., Kirjanów-Błażej A., Kozłowski T., Olchówka D. Optymalizacja kosztów eksploatacji taśm przenośnikowych w kopalni w różnych strategiach ich wymiany i diagnostyki, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 4, 2020, 14-22.
42. Jurdziak L., Prewencyjne strategie wymian taśm przenośnikowych. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Konferencje nr 26, Podstawowe Problemy Transportu Kopalnianego, 2000.
43. Jurek M., Zastosowanie termografii aktywnej w badaniu stanu powierzchni elementów stalowych, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, 64, 2017, 65-75. <https://doi.org/10.7862/rb.2017.231>
44. Józwik J., Dziejczak K., Barszcz M., Pashechko M., Analysis and Comparative Assessment of Basic Tribological Properties of Selected Polymer Composites, Materials, 13, 2020, 75. <https://doi.org/10.3390/ma13010075>
45. *Katalog Continental*, 2023, https://www.continental-industry.com/getmedia/b83f4263-4076-4ab5-a576-cac7fd4a37b3/Continental-Belt-Monitoring-Systems_en.pdf (dostęp 12.09.2023).
46. *Katalog taśmy przenośnikowe z linkami stalowymi Trellex*, 2023, <https://www.elsener-svt.ch/index.php?id=0000000209> (dostęp 12.09.2023).
47. Keil S., Technology and Practical Use of Strain Gages, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 2017.
48. Kirjanów-Błażej A., Błażej R., Jurdziak L., Kozłowski T., Burduk A., Ocena jakości połączeń taśm przenośnikowych w podejściu procesowym, Transport, 1(47), 2020, 2-9.
49. Kirjanów-Błażej A., Jurdziak L., Błażej R., Rzeszowska A., Calibration procedure for ultrasonic sensors for precise thickness measurement, Measurement, 214, 2023, 112744. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112744>
50. Kocańda S., Szala J., Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN, Warszawa 1997.
51. Komorska I., Puchalski A., Rotating Machinery Diagnosing in Non-Stationary Conditions with Empirical Mode Decomposition-Based Wavelet Leaders Multifractal Spectra, Sensors 21, 2021, 7677. <https://doi.org/10.3390/s21227677>
52. Kowalewski Z., Szymczak T., Podstawy tensometrii elektrooporowej oraz praktyczne jej zastosowania, Dziewiętnaste Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, 2013. <https://www.ippt.pan.pl/repository/open/o2162.pdf> (dostęp 12.09.2023).
53. Kozłowski T., Wodecki J., Zimroz R., Błażej R., Hardygóra M., A Diagnostics of Conveyor Belt Splices, Applied Sciences, 10(18), 2020, 6259. <https://doi.org/10.3390/app10186259>
54. Kozłowski T., Błażej R., Jurdziak L., Kirjanów-Błażej A., Magnetic methods in monitoring changes of the technical condition of splices in steel cord conveyor belts, Engineering Failure Analysis, 104, 2019, 462-470. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.022>
55. *Łączenie taśm przenośnikowych z linkami stalowymi*, 2023, <https://conveyorbeltguide.com/st-splicing.html> (dostęp 12.09.2023).

56. Lewińska-Romicka A., *Badania nieniszczące – Podstawy defektoskopii*. WNT, Warszawa 2001.
57. Li X., Shen L., Ming Z., Zhang C., Jiang H., Laser-based on-line machine vision detection for longitudinal rip of conveyor belt, *Optik*, 168, 2018, 360-369.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.053>
58. Lutyński A., *Identyfikacja własności mechanicznych tkaninowych taśm przekładkowych eksploatowanych w przenośnikach górniczych*. Politechnika Śląska Zeszyty Naukowe nr 1054, Gliwice 1989.
59. Lv Zh., Zhang X., Hu J., Lin K., Visual detection method based online lasers for the detection of longitudinal tears in conveyor belts, *Measurement*, 183, 2021, 109800.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109800>
60. Mazurkiewicz D., *Studium wybranych aspektów diagnostyki eksploatacyjnej transportu taśmowego*. Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
61. *Metody łączenia przenośnikowych taśm tekstylnych*, 2023 <https://conveyorbeltguide.com/tx-splices.html> (dostęp 12.09.2023).
62. Mishra M.K., Yagci Y. (Eds.), *Handbook of Vinyl Polymers: Radical Polymerization, Process, and Technology*, Second Edition. CRC Press, Boca Raton 2016.
63. Mypati O., Mukherjee A., Mishra D., Pal K.S., Chakrabarti P.P., Pal A., A critical review on applications of artificial intelligence in manufacturing, *Artificial Intelligence Review*, 56, 2023, 661-768. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10535-y>
64. Nowakowski M., The ANOVA method as a popular research tool, *Studia i Prace WNEiZ*, 55, 2019, 67-77. <https://doi.org/10.18276/sip.2019.55-06>
65. Pansare S. S., Mitra C. A., Varal S., Malgundkar G., Kavankar D., Remotely controlled data – acquisition experimental setup for stress-strain measurement, *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 6(2), 2019, 134-136.
66. PN-EN ISO 283:2016-01, Taśmy przenośnikowe z rdzeniem tekstylnym – Wytrzymałość na rozciąganie taśmy o całkowitej grubości, wydłużenie przy zerwaniu oraz wydłużenie przy zadanym obciążeniu – Metoda badania.
67. PN-EN ISO 9000:2015 „Systemy zarządzania jakością. Podstawy i terminologia”.
68. PN-ISO 2148:1998 Urządzenia transportu ciągłego – Terminy.
69. PN-EN ISO 14890:2013-06 Taśmy przenośnikowe – Wymagania dotyczące taśm przenośnikowych ogólnego stosowania z rdzeniem tekstylnym i okładkami gumowymi lub okładkami z tworzyw sztucznych.
70. PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
71. *Producent Tensometru*, 2023 <https://www.dfrobot.com/product-1843.html> (dostęp 12.09.2023).
72. *Program Terminal*, 2023, <https://sites.google.com/site/terminalbpp/> (dostęp 12.09.2023).
73. Proniewicz E., Krawiec H., Starowicz M., Lelek-Borkowska U., Święch D., *Podstawy chemii polimerów*. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Kraków 2021, s. 84-87.
74. Pytlik A., Trela K., Research on tightness loss of belt conveyor's idlers and its impact on the temperature increase of the bearing assemblies, *Journal of Sustainable Mining*, 15(2), 2016, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.07.001>
75. *Raport VMR, PVC Solid Woven Conveyor Belts Market Size And Forecast*, <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/pvc-solid-woven-conveyor-belts-market/> (dostęp 12.09.2023 r.).

76. Ręklewski M., Statystyka opisowa. Teoria i przykłady. Państwowa Uczelnia Zawodowa we Włocławku, Włocławek 2020.
77. Rucki M., Siemiątkowski Z., Ryba T., Bzinkowski D., Solecki M., Design and calibration of the system supervising belt tension and wear in an industrial feeder, *Facta Universitatis: Series Mechanical Engineering*, 20(1), 2022, 167-176. <https://doi.org/10.22190/FUME201004026R>
78. Rumin P., Kotowicz J., Hogg D., Zastawna-Rumin A., Utilization of measurements, machine learning, and analytical calculation for preventing belt flip over on conveyor belts, *Measurement*, 218, 2023, 113157. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113157>
79. Ryba T., Metodyka badań urządzenia do kontroli napięcia i zużycia taśm gumowych w przenośnikach. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Radom 2020.
80. Ryba T., Bzinkowski D., Siemiątkowski Z., Rucki M., Stawarz S., Caban J., Samociuk W., Monitoring of Rubber Belt Material Performance and Damage, *Materials* 2024, 17, 765. <https://doi.org/10.3390/ma17030765>
81. Sandurska E., Szulc A., A method of statistical analysis in the field of sports science when assumptions of parametric tests are not violated, *Journal of Education Health and Sport*, 6(13), 2016, 275-287. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.293762>
82. Studnik K., Król M., Wykrywanie nieciągłości materiałów metalowych za pomocą badań nieniszczących, *Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych*, nr 2, 2017, 255-270.
83. Subba Rao D.V., *The Belt Conveyor: A Concise Basic Course*. CRC Press, London 2021.
84. Suchoń J. *Górnictwo przenośniki zgrzeblowe. Teoria, Badania i Eksploatacja*. Instytut techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012.
85. *System CBGuard*, International Mining, Page 29, January 2023 <https://viewer.joomag.com/im-jan-23/0012417001671538961> (dostęp 12.09.2023).
86. *System Conti RipProtect*, 2023, <https://www.continental-industry.com/en/solutions/conveyor-belt-systems/conveyor-services/digital-solutions/belt-monitoring-systems/products/range-of-products/conti-ripprotect> (dostęp 12.09.2023).
87. *System detekcji radiograficznej*, 2023 <https://www.cbg.website/> (dostęp 12.09.2023).
88. Szala J., Ligaj B., Szala G., Źródła różnic w wynikach obliczeń i badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport* z. 83, 2014, 774–781.
89. Szosland J., *Struktury Tkaninowe*. PAN, Łódź 2007.
90. *D'Agostino-Pearson Test*, 2023. <https://www.statskingdom.com/dagostino-pearson-test-calculator.html> (dostęp 12.09.2023).
91. Waibel M.W., Oosthuizen G.A., du Toit D.W., Investigating current smart production innovations in the machine building industry on sustainability aspects, *Procedia Manufacturing*, 21, 2018, 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.183>
92. Wang Y., Miao Ch., Liu Y., Meng D., Research on a sound-based method for belt conveyor longitudinal tear detection, *Measurement*, 190, 2022, 110787. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110787>
93. Wiczerowski M., Kucharski D., Sniatala P., Pawlus P., Krolczyk G., Gapinski B., A novel approach to using artificial intelligence in coordinate metrology including nano scale, *Measurement*, 217, 2023, 113051. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113051>
94. Yang R., Qiao T., Pang Y., Yang Y., Zhang H., Yan G., Infrared spectrum analysis method for detection and early warning of longitudinal tear of mine conveyor belt, *Measurement*, 165, 2020, 107856. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107856>

95. Yang Y., Miao Ch., Li X., Mei X., On-line conveyor belts inspection based on machine vision, *Optik*, 125(19), 2014, 5803-5807. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.07.070>
96. Zarzycki J., Kulinowski P., Kasza P., Doświadczenia z laboratoryjnych badań zdolności taśm przenośnikowych do układania się w nieckę, *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, 2, 2017, 16-20.
97. Zeng F., Zhang S., Wang T., Wu Q., Mini-Crack Detection of Conveyor Belt Based on Laser Excited Thermography, *Applied Science*, 11(22), 2021, 10766. <https://doi.org/10.3390/app112210766>
98. Zenisek J., Wild N., Wolfartsberger J. Investigating the potential of smart manufacturing technologies. *Procedia Computer Science*, 180, 2021, 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.269>
99. Zhang M., Jiang K., Cao Y., Li M., Wang Q., Li D., Zhang Y., A new paradigm for intelligent status detection of belt conveyors based on deep learning, *Measurement*, 213, 2023, 112735. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112735>
100. Zhang M., Shi H., Zhang Y., Yu Y., Zhou M., Deep learning-based damage detection of mining conveyor belt, *Measurement*, 175, 2021, 109130. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109130>
101. Živanić D., Ilanković N., Zelić A., Katona M., Analysis of OSH accidents concerning conveyors and belt conveyors in the USA between 1984 and 2019, *Proceedings of the Conference „Politehnika 6”*. Belgrade, Serbia, 10.12.2021, pp. 309-314
102. Zuperl U., Stepien K., Mundar G., Kovačić M., A Cloud-Based System for the Optical Monitoring of Tool Conditions during Milling through the Detection of Chip Surface Size and Identification of Cutting Force Trends. *Processes*, 10(4), 2022, 671. <https://doi.org/10.3390/pr10040671>
103. Zvirblis T., Petkevicius L., Bzinkowski D., Vaitkus D., Vaitkus P., Rucki M., Kilikevicius A., Investigation of deep learning models on identification of minimum signal length for precise classification of conveyor rubber belt loads, *Advances in Mechanical Engineering*. 14(6), 2022, 1-13. <https://doi.org/10.1177/16878132221102776>