



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu



Dipl. -Ing. Armando Miguel Rilo Cañas

**KONCEPCJA WYDŁUŻENIA CZASU
UŻYTKOWANIA ZESTAWÓW KOŁOWYCH W
ELEKTRYCZNYCH ZESPOŁACH TRAKCYJNYCH**

Praca doktorska

Promotor:
dr hab. inż. Wojciech SAWCZUK, prof. PP

Promotor pomocniczy:
dr inż. Grzegorz GRAMZA

Poznań 2024

SPIS TREŚCI

Streszczenie	5
Summary	6
Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli	7
WPROWADZENIE	9
1. ZUŻYCIE W STYKU KOŁO-SZYNA	12
1.1. Modele tarcia i zużycia ciernego w styku koła z szyną	12
1.2. Warstwa wierzchnia wieńca koła	20
1.3. Miary zużycia kół kolejowych	24
1.4. Ocena zużycia kół zestawów kołowych	27
1.5. Podsumowanie zużycia powierzchni tocznej kół kolejowych	30
2. PROCESY OBSŁUGOWO-NAPRAWCZE POJAZDÓW SZYNOWYCH	31
2.1. Stan wiedzy z zakresu czynności obsługowo-naprawczych	31
2.2. Specyfika działania i strategię eksploatacji kolejowych systemów technicznych	34
2.3. Miary i wskaźniki oceny efektywności systemu eksploatacji	37
2.4. Nowoczesne metody zarządzania w eksploatacji pojazdów szynowych	40
2.5. Podsumowanie stanu wiedzy w zakresie procesów obsługowo-naprawczych stosowanych w eksploatacji pojazdów szynowych	43
3. BADANIA ROZPOZNAWCZE ZUŻYCIA KÓŁ POJAZDU EN97	44
3.1. Geneza badań rozpoznawczych	44
3.2. Metodyka badań rozpoznawczych	44
3.2.1. Wyniki badań parametrów geometrycznych profilu koła kolejowego pojazdu EN97	49
3.2.2. Wyniki badań zużycia zestawów kołowych pojazdu EN97	54
3.3. Podsumowanie wyników badań rozpoznawczych zużycia kół pojazdu EN97	64
4. BADANIA ROZPOZNAWCZE ZUŻYCIA KÓŁ I TARCZ HAMULCOWYCH POJAZDU EN76	65
4.1. Geneza badań	65
4.2. Obiekt badań	66
4.3. Metodyka badań	67
4.3.1. Wyniki badań średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych	68
4.3.2. Wyniki badań zużycia kół i tarcz hamulcowych pojazdu EN76	76
4.4. Intensywność zużycia zestawów kołowych	85
4.5. Modelowanie zużycia zestawów kołowych	86
4.6. Podsumowanie z badań zużycia kół i tarcz hamulcowych pojazdu EN76	97
5. PROBLEMATYKA NAUKOWO-BADAWCZA PRACY DOKTORSKIEJ	98
5.1. Wprowadzenie do problematyki badawczej pracy	98
5.2. Teza i cel pracy	100
5.3. Zadania niezbędne do osiągnięcia celu pracy	101
6. KONCEPCJE ZARZĄDZANIA ZESTAWAMI KOŁOWYMI	102
6.1. Wprowadzenie do koncepcji zarządzania zestawami kołowymi	102
6.1.1. Koncepcja zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe ZZWP	103
6.1.2. Koncepcja zamiany zestawów kołowych w wózku ZZWW	104
6.1.3. Koncepcja zamiany wózków bez obracania ZWBO	105
6.1.4. Koncepcja zamiany wózków z obracaniem ZWZO	105
6.2. Warunki brzegowe koncepcji zarządzania zestawami kołowymi	106
6.3. Wyniki wartości średnicy kół po zarządzaniu zestawami kołowymi i wózkami	108
6.4. Wyniki wartości grubości tarcz po zarządzaniu zestawami kołowymi i wózkami	114

6.5. Podsumowanie koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.....	127
7. OCENA ZAPROPONOWANYCH KONCEPCJI ZARZĄDZANIA ZESTAWAMI KOŁOWYMI	128
7.1. Ocena przydatności wyników badań.....	128
7.2. Wybór kryteriów oceny i ich wartościowanie	129
7.3. Analiza przydatności koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami...	132
7.4. Przykład algorytmu zarządzania zestawami kołowymi	135
7.5. Propozycje zmian w konstrukcji układu biegowego pojazdu szynowego.....	141
7.6. Podsumowanie z analizy wielokryterialnej.....	143
8. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA KONCEPCJI ZARZĄDZANIA ZESTAWAMI KOŁOWYMI	144
8.1. Obiekt badań	144
8.2. Wyniki badań średnicy kół	148
8.3. Wyniki wartości średnicy kół po zarządzaniu zestawami kołowymi	151
8.4. Podsumowanie badań.....	158
9. PODSUMOWANIE PRACY	160
9.1. Wnioski naukowe.....	160
9.2. Wnioski praktyczne.....	162
9.3. Propozycja kierunków dalszych badań	163
LITERATURA.....	164
ZAŁĄCZNIK A: Wykresy zużycia zestawów kołowych	172
ZAŁĄCZNIK B: Procedury programu Matlab do zarządzania zestawami kołowymi.....	181

Streszczenie

W niniejszej pracy doktorskiej podjęto problematykę oceny zjawisk zużycia na zestawie kołowym wieloczołowych zespołów trakcyjnych. Do analizy wybrano zestaw kołowy wraz z układem hamulcowym na wózkach tocznych i napędnych. Zestaw kołowy jako podstawowy obiekt techniczny układu biegowego, w największym stopniu podlega oddziaływaniu pochodzącego zarówno od pojazdu i od toru, co wpływa na jego zużycie. W pracy zwrócono uwagę na działanie układu hamulcowego i pośrednio na liczbę wymian kół zestawu przed osiągnięciem granicznego dopuszczalnego zużycia, który podczas procesu hamowania dodatkowo wpływa na proces zużycia tarcz hamulcowych. Proces zużycia kół jak i tarcz hamulcowych przebiega nierównomiernie, co dla przewoźnika wiąże się to z wyłączeniem pojazdu, raz w przypadku osiągnięcia maksymalnego zużycia tarcz oraz drugi raz w przypadku wystąpienia granicznego zużycia kół. Proces wywiązania zestawu kołowego z wózka, jak i jego naprawa jest procesem czasochłonnym i kosztownym, co w konsekwencji wpływa na wyłączenie pojazdu z ruchu planowego. Dlatego zasadnym jest w przypadku pojazdów wieloczołowych jak zespołów trakcyjnych monitorowanie oraz analiza jednoczesnego zużycia kół jak i tarcz hamulcowych na etapie przeglądów okresowych oraz podjęcie takich działań organizacyjno-technicznych aby uzyskać dłuższe czasy użytkowania kół i tarcz.

Celem naukowym pracy doktorskiej jest koncepcja optymalizacji procesu obsługowo-naprawczego zestawu kołowego w zakresie techniczno-ekonomicznym dla wybranych typów pojazdów. Osiągnięcie celu pracy jest możliwe przez ocenę zjawisk tarcia i jego modelowanie dla kół kolejowych oraz tarcz hamulcowych w wybranych pojazdach szynowych tj. w elektrycznych zespołach trakcyjnych.

Celem utylitarnym pracy jest opracowanie innowacyjnych algorytmów obsługowo-naprawczych dla zestawów kołowych, stosowanych podczas przeglądów okresowych dla zmniejszenia zjawiska intensywności zużycia kół i tarcz hamulcowych oraz wydłużenia czasu ich użytkowania.

Summary

This doctoral thesis addresses the issue of assessing the wear phenomena on the wheel set of multi-unit traction units. The wheel set together with the braking system on the rolling and driving bogies was selected for analysis. The wheel set, as the basic technical object of the running system, is most subject to the impact of both the vehicle and the track, which affects its wear. The work draws attention to the operation of the braking system and indirectly to the number of wheel replacements before reaching the limit of permissible wear, which additionally affects the process of brake disc wear during the braking process. The process of wheel and brake disc wear is uneven, which for the carrier involves switching off the vehicle, once when the maximum wear of the discs is reached and again when the limit of wheel wear occurs. The process of releasing the wheel set from the bogie and its repair is time-consuming and expensive, which consequently affects the exclusion of the vehicle from planned traffic. Therefore, it is essential in the case of multi-unit vehicles such as traction units to monitor and analyze the simultaneous wear of wheels and brake discs at the stage of periodic inspections and to take such organizational and technical actions to obtain longer service times of wheels and discs.

The scientific goal of the doctoral thesis is the concept of optimization of the service and repair process of the wheel set in the technical and economic scope for selected types of vehicles. Achieving the goal of the work is possible by assessing friction phenomena and its modeling for railway wheels and brake discs in selected rail vehicles, i.e. in electric traction units.

The utilitarian goal of the work is to develop innovative service and repair algorithms for wheel sets, used during periodic inspections to reduce the intensity of wheel and brake disc wear and extend their service life.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli

A_z	–	odległość między wewnętrznymi powierzchniami obręczy w zestawie kołowym bez obciążenia [mm]
T	–	siła tarcia [N]
N	–	siła nacisku [N]
G	–	siła ciężkości [N]
A	–	siły cząsteczkowe (adhezja) [N]
D	–	średnica koła w okręgu tocznym [m]
P	–	siła pchająca [N]
E	–	średnia energia zużywana na rozerwanie pary cząsteczek [J]
E_z	–	odległość między zarysami obrzeży tzw. szerokość prowadna [mm]
H	–	twardość Vickersa
P	–	średnia wartość siły odpychania
P_k	–	siła kierująca
N_o	–	siły przyciągania molekularnego
I_{OZ}	–	objętościowa odporność na zużycie
I_{ZO}	–	intensywność zużycia obrzeża
I	–	intensywność zużycia
I_K	–	intensywność zużycia kół kolejowych
I_T	–	intensywność zużycia tarcz hamulcowych
l_i	–	liczebność
l	–	odległość poszczególnych par cząsteczek [m]
L	–	droga tarcia [m]
N	–	siła nacisku [N]
p	–	nacisk jednostkowy [MPa]
p_i	–	częstość [%]
p_m	–	przebieg pojazdu [km]
q_r	–	stromość obrzeża [mm]
R_z	–	parametr chropowatości powierzchni [μm]
R^2	–	współczynnik determinacji
S_c	–	powierzchnia ścinania
S_p	–	zbiór parametrów stanu powierzchni
S_{sp}	–	zbiór parametrów stanu stref przypowierzchniowych
T	–	temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
O_g	–	grubość obrzeża [mm]
O_w	–	wysokość obrzeża [mm]
U	–	ubytek objętościowy materiału
Q	–	siła pionowa [N]
\bar{x}	–	średnia arytmetyczna
v	–	względna prędkość poślizgu
v_{wz}	–	prędkość względna [m/s]
Y	–	siła prowadząca [N]
Z	–	zużycie
Z_D	–	zużycie wieńca koła [mm]
Z_n	–	stan warstwy wierzchniej
Z_{wz}	–	zużycie względne [%]
Z_{bz}	–	zużycie bezwzględne [mm]

Litery greckie

α	–	kąt pochylenia toru
σ	–	naprężenia normalne na powierzchni materiału
γ	–	kąt pochylenia obrzeża koła
μ	–	współczynnik tarcia
μ_m	–	współczynnik tarcia tocznego
μ_{obl}	–	obliczeniowy współczynnik tarcia tocznego
τ	–	naprężenia ścinające
λ	–	poślizg względny

Skróty

AI	–	<i>artificial intelligence</i> – sztuczna inteligencja
DSU	–	Dokumentacja Systemu Utrzymania
ED	–	<i>electro-dynamic brake</i> – hamulec elektrodynamiczny
EP	–	<i>electro-pneumatic brake</i> – hamulec elektropneumatyczny
ETA	–	Event Tree Analysis – analizy drzewa zdarzeń
FMEA	–	<i>Failure Mode and Effect (Critical) Analysis</i> – analiza przyczyn i skutków wad
MUZ	–	Metoda Unitaryzacji Zerowanej
PZN	–	Planowo-zapobiegawczych napraw (remontów)
PN-EN	–	Polska Norma wprowadzająca (metodą tłumaczenia) normę europejską
RBM	–	<i>Risk Based Maintenance</i> – inspekcja oparta na ocenie ryzyka
RCE	–	<i>Reliability Centred Maintenance</i> – obsługa okresowa skoncentrowana na niezawodności
SIWZ	–	Specyfikacja Istotnych Warunków Zamówienia
TSI	–	Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności
UIC	–	<i>Union Internationale des Chemins de fer</i> – Międzynarodowy Związek Kolei Normalnotorowych
WA	–	<i>Vibro-Acoustic</i> – wibroakustyka
WTWiO	–	Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru

WPROWADZENIE

Zestaw kołowy pojazdu szynowego jest podstawowym zespołem odpowiedzialnym za prowadzenie pojazdu szynowego w torze, a jego stan techniczny bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo w ruchu kolejowym. Podnoszenie prędkości jazdy pojazdów szynowych, ze względu na skracanie czasu jazdy i budowa czy modernizacja linii kolejowych do wyższych prędkości sprawia, że zestaw kołowy wymaga szczególnej uwagi w zakresie konstrukcji, oceny stanu technicznego i podjętych działań w procesach obsługowo naprawczych. W ruchu aglomeracyjnym, regionalnym czy międzyregionalnym praktyką jest formowanie składów kolejowych w postaci spalinowych czy elektrycznych zespołów trakcyjnych na rzecz wcześniejszych składów wagonowych ciągniętych przez lokomotywy. Zespoły trakcyjne obecnie budowane są na prędkości do 160 km/h jako składy wielocłonowe bez możliwości dzielenia ich. Z jednej strony jest to dużym ograniczeniem ze względu na brak możliwości dopasowania długości składu do większych potoków pasażerów w różnych okresach dnia jak np. godziny ranne związane z dojazdem do pracy i szkół czy godziny popołudniowe związane z powrotami do domów. Z drugiej strony zespoły trakcyjne w odniesieniu do lokomotyw cechują się mniejszym zużyciem energii zużywanej do celów trakcyjnych i mniejszym zużyciem hamulców ciernych jak również są mniej podatne na rozerwania składu, co zdarza się w pociągach towarowych. Dodatkową zaletą zespołów trakcyjnych jest możliwość zmiany kierunku jazdy, co w przypadku składów wagonowych byłoby możliwe tylko w przypadku składów typu push-pull z dodatkowym wagonem sterowniczym na końcu pociągu. Z praktyki kolejowej wspomniana technologia przewozów nie jest zalecana.

Przeprowadzone studium literaturowe z zakresu układów biegowych pojazdów szynowych pozwoliło na stwierdzenie, że w największym stopniu, prace te dotyczą zestawów kołowych. W szczególności publikacje dotyczą procesu zużycia, stanu warstwy wierzchniej powierzchni tocznej, kryterium bezpieczeństwa przed wykolejeniem (zależność Y/Q), kontaktu koła z szyną i poślizgu kół czy szeroko rozumianego modelowania (tarcia, stanów naprężeń, odkształceń, warstwy wierzchniej itp.). Jednoznacznie świadczy to, że tematyka związana z zestawami kołowymi jest cały czas analizowana przez wielu badaczy w różnych obszarach badawczych, jeszcze na etapie projektowania i badań symulacyjnych, zjawisk w warstwie wierzchniej czy na etapie utrzymania przy zachowaniu pełnej zdatności w procesie użytkowania.

Konieczność podjęcia dalszych prac nad zestawami kołowymi, wymuszają od kilku lat realizowane programy inwestycyjne związane z branżą kolejową. Głównym celem tych programów jest zwiększenie dostępności do przewozów kolejowych w Polsce, poprawa komfortu jazdy w miastach i poza nimi, zwiększenie prędkości jazdy i skrócenie czasu podróży czy zapewnienie lepszych warunków dla transportu ładunków. Wspomniane programy inwestycyjne finansowane są z budżetu państwa oraz ze środków z programów europejskich.

Największą inwestycją w Polsce jest budowa Centralnego Portu Komunikacyjnego jako węzła przesiadkowego między Warszawą i Łodzią, który ma zintegrować transport lotniczy, kolejowy i drogowy. Inwestycja ma zostać zrealizowana do 2027 roku. Część kolejowa tego projektu zakłada budowę 1600 km nowych linii prowadzących z 10 kierunków do Portu Lotniczego „Solidarność” i Warszawy. Pod koniec 2019 roku uchwalono „Strategię Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku”, zgłoszoną przez ministra infrastruktury. Głównym celem tego programu jest zwiększenie dostępności transportowej oraz poprawa szeroko rozumianego bezpieczeństwa w transporcie kolejowym i utworzenie

spójnego, zrównoważonego, innowacyjnego i przyjaznego pasażerom systemu transportowego na poziomie krajowym i europejskim. Kolejnym ważnym projektem realizowanym w Polsce jest Program Inwestycji Dworcowych zakładający modernizację i budowę około 200 dworców kolejowych. Podobnym projektem do Programu Inwestycji Dworcowych jest projekt Kolej Plus. Jego celem jest uzupełnienie sieci kolejowej o połączenia kolejowe miejscowości o populacji powyżej 10 tys. mieszkańców, które nie posiadają dostępu do połączeń pasażerskich z miastami wojewódzkimi. Pod koniec roku 2017 PKP Intercity przyjęło nową strategię taborową na lata 2016-2020 z perspektywą do 2023 roku dotyczącą unowocześnienia parku taborowego. Przewoźnik kolejowy przeznaczył na nią ponad 7 mld zł łącznie ze środkami z Unii Europejskiej (około 790 mln zł). Program ten obejmuje modernizację i zakup wagonów, lokomotyw oraz elektrycznych zespołów trakcyjnych na prędkość 200 km/h. W roku 2018 roku przyjęto uchwałę w sprawie otwarcia programu wieloletniego na pomoc w zakresie finansowania kosztów zarządzania infrastrukturą kolejową (głównie jej utrzymania i remontów do 2023 roku). Program zapewni wieloletnie dofinansowanie kosztów zarządzania infrastrukturą kolejową, zwłaszcza w obszarze utrzymania i remontów, ponoszonych przez jej zarządców. Realizacja programu w swoich założeniach ma wpłynąć na poprawę jakości infrastruktury kolejowej dzięki której ma wzrosnąć konkurencyjność transportu szynowego nad przewozami drogowymi [111].

Wszystkie wymienione programy realizowane lub zakończone w Polsce zarówno w zakresie infrastruktury czy taboru są dedykowane w głównej mierze dla zespołów trakcyjnych, które mają ułatwić komunikację pasażerów z mniejszych miejscowości i poprawić jakość i bezpieczeństwo w ruchu kolejowym.

Wyniki badań rozpoznawczych autora, przeprowadzonych na elektrycznych zespołach trakcyjnych, dowodzą o nierównomiernym zużyciu poszczególnych zestawów kołowych. Świadczą o tym wyniki pomiarów parametrów geometrycznych opisujących profil koła. Dokumentacja systemu utrzymania zespołów trakcyjnych nakazuje dla zachowania zbliżonych wartości średnic kół przetaczanie profilu koła zestawów kołowych zarówno zużytych jak i bez śladów zużycia czy widocznych wad.

Efektom przeprowadzonych badań rozpoznawczych było opracowanie przez autora pracy koncepcji zarządzania zestawami kołowymi w celu zmniejszenia zjawiska zużycia kół w taki sposób, że stwierdzone podczas przeglądów zestawy o największym zużyciu przekładane są w miejsca pojazdu o najmniejszym zużyciu na średnicy kół lub tarcz hamulcowych. Przeanalizowano wszystkie zaproponowane koncepcje w zakresie kosztowym, organizacyjnym i technicznym, co pozwoliło na opracowanie algorytmów zarządzania zestawami kołowymi. Wcześniej nie prowadzone były w podobnym zakresie prace.

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów. W rozdziale I pracy przedstawiono zagadnienia związane z procesem zużycia w styku koła z szyną, przedstawiono modele tarcia i zużycia wieńców kół. Przedstawiono miary zużycia oraz metody oceny zużycia kół kolejowych na podstawie dostępnej literatury.

Rozdział II pracy zawarto stan wiedzy z zakresu procesów obsługowo-naprawczych pojazdów szynowych. W rozdziale opisano strategię eksploatacji w odniesieniu do pojazdów szynowych, miary i wskaźniki oceny efektywności systemów eksploatacji oraz nowoczesne metody zarządzania w eksploatacji pojazdów szynowych.

Rozdział III pracy jest poświęcony badaniom rozpoznawczym przeprowadzonych na elektrycznych zespołach trakcyjnych serii EN97. Na podstawie zebranych wyników pomiaru parametrów geometrycznych zestawu kołowego wyznaczono charakterystyki zmiany wszystkich parametrów w ujęciu ilościowym i jakościowym na poszczególnych zestawach kołowych. Wyznaczono również zależności w zakresie zużycia zestawów kołowych w zależności od lokalizacji ich na pojeździe.

W rozdziale IV zaprezentowano metodykę oraz wyniki kolejnych badań rozpoznawczych przeprowadzonych na serii pojazdów EN76 w zakresie zmiany dwóch parametrów zestawu kołowego tj. średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych. W rozdziale wyznaczono intensywność ich zużycia oraz przedstawiono modele opisujące zmianę średnicy kół i grubości tarcz w funkcji przebiegu zestawu kołowego. Na tej podstawie dokonano prognozowania dalszego przebiegu zestawu kołowego do osiągnięcia kresowego zużycia na średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych.

W rozdziale V sformułowano własną problematykę badawczą, cel i zakres badawczy pracy oraz przedstawiono zadania badawcze umożliwiające osiągnięcie wyznaczonego celu.

Rozdział VI przedstawia cztery koncepcje zarządzania zestawami kołowymi w celu wydłużenia czasu użytkowania i przebiegu zestawów kołowych do osiągnięcia wymiaru kresowego w zakresie średnicy kół jak i grubości tarcz hamulcowych. W rozdziale zaproponowano koncepcję migracji zestawów kołowych pod pojazdem, koncepcję zamiany zestawów w ramach jednego wózka oraz koncepcję zamiany wózków ze zmianą i bez zmiany kierunku jazdy. Dla wszystkich koncepcji dokonano prognozowania dalszego przebiegu zestawów kołowych.

W rozdziale VII pracy zawarto ocenę możliwości zastosowania wszystkich koncepcji w warunkach rzeczywistych podczas przeglądów okresowych. W rozdziale dokonano analizy przydatności parametrów i symptomów stanu zestawu kołowego do zastosowania danej koncepcji. Również przedstawiono założenia dla przyszłej konstrukcji wózków w celu zastosowania niektórych koncepcji oraz zaprezentowano algorytm zarządzania zestawami kołowymi w elektrycznym zespole trakcyjnym serii EN76.

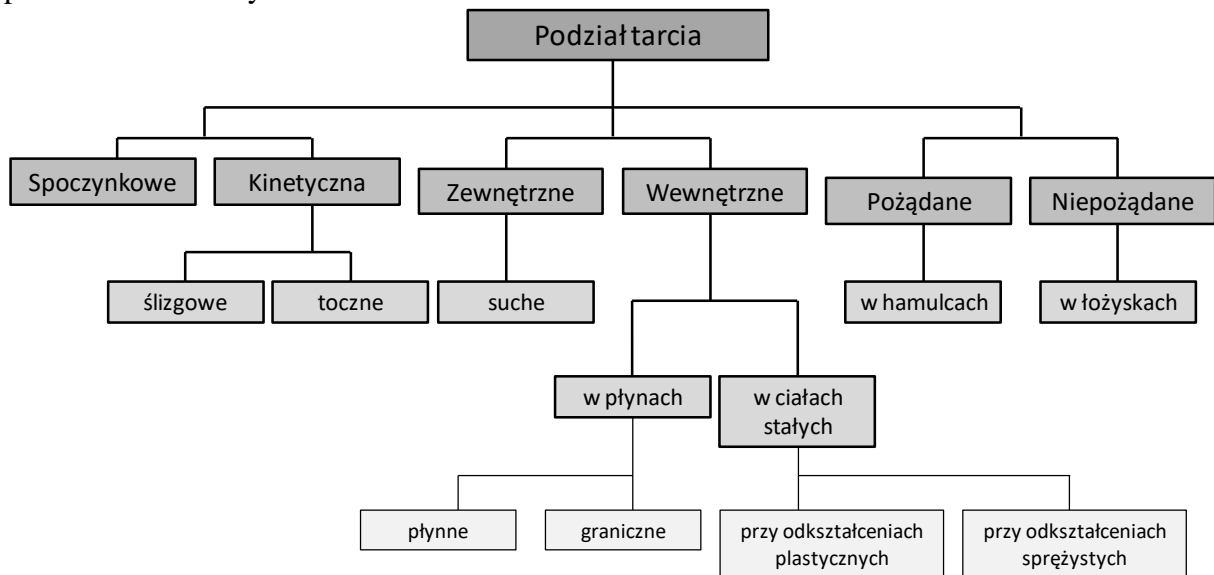
Rozdział VIII pracy przedstawia wyniki badań na innym zespole trakcyjnym tj. EN57AL w którym zastosowano opracowane koncepcje i wybrano najlepszą w ujęciu technicznym tj. wydłużenia czasu użytkowania i wydłużenia przebiegu pojazdu. Na tej podstawie uzyskano potwierdzenie postawionych celów pracy i tezy badawczej.

W rozdziale IX podsumowano pracę, przedstawiono wnioski poznawcze i praktyczne oraz kierunki dalszych badań w zakresie zestawów kołowych pojazdów szynowych.

1. ZUŻYCIE W STYKU KOŁO-SZYNA

1.1. Model tarcia i zużycia ciernego w styku koła z szyną

Zjawisko tarcia jest efektem działania procesów dysypacyjnych, którym towarzyszy zjawisko rozpraszania energii w wyniku zmian temperaturowych, zjawisk elektrycznych czy mechanicznej destrukcji. Tarcie występujące w obszarze styku dwóch współpracujących elementów, co w konsekwencji wpływa na przyrost oporów ruchu [65]. W inżynierii mechanicznej można wyróżnić wiele rodzajów tarcia. Jednak podstawowym podziałem jest podział tarcia ze względu na rodzaj ruchu skojarzonych elementów. Wówczas tarcie dzieli się na kinetyczne (czyli ruchowe, w którym prędkość względna v_{wz} jest większa od zera) oraz spoczynkowe, kiedy v_{wz} obszarów tarcia dwóch ciał jest równa zero. Podział tarcia przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Podział tarcia [32]

Toczący się zestaw kołowy po szynie jest złożonym przykładem tarcia, zgodnie z rysunkiem 1.1 występuje większa część przypadków rodzaju tarcia. W pierwszej kolejności należy podkreślić, że obracający się zestaw kołowy względem szyny tworzy parę cierną z tarcie kinetycznym tocznym, w sytuacji zablokowania się zestawu kołowego przy nagłym hamowaniu gdzie prędkość dowolnego punktu na obwodzie koła będzie równa zero, wówczas występuje tarcie kinetyczne ślizgowe. W sytuacji rozruchu powodującego zerwanie styku koła z szyną również występuje przypadek tarcia ślizgowego podczas którego pojazd nie przemieszcza się. Jest to jednak bardzo rzadko występująca sytuacja, przykładem mogą być szyny zanieczyszczone smarem lub pokryte mokrymi liśćmi w okresie jesiennym. Zarówno tarcie kinetyczne ślizgowe jak i toczne dla zestawu kołowego występuje między powierzchniami zakrzywionymi. Dla zestawu kołowego jest okrąg o średnicy D ze stożkowatym kształtem profilu koła, a dla szyny kształt główki w przekroju poprzecznym. Obszar styku będzie jednopunktowy lub dwupunktowy w przypadku jazdy w łuku lub na torze zużytym na odcinku prostym.

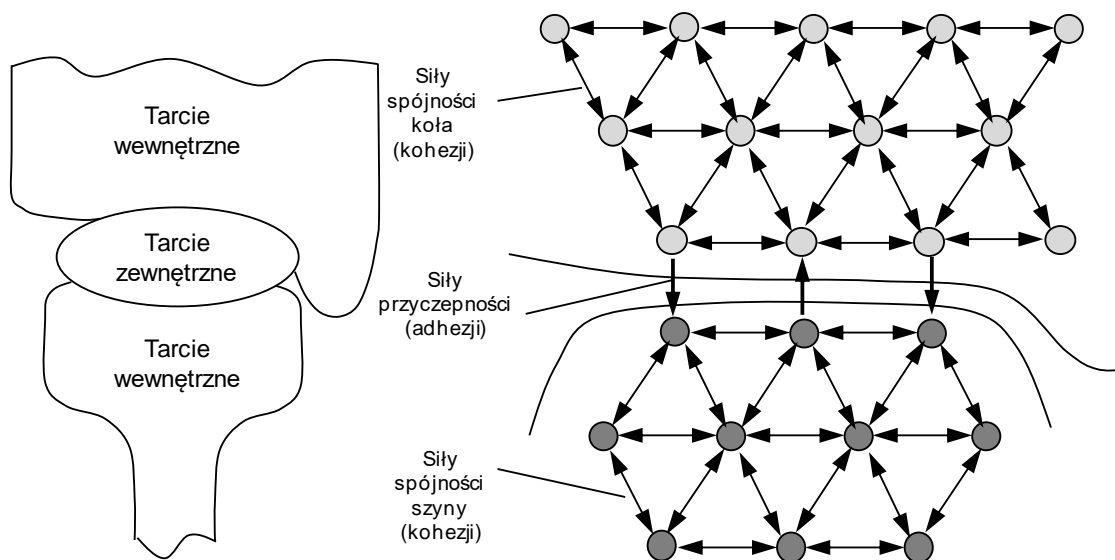
Fizyczne oddziaływanie koła z szyną należą do grupy tarcia zewnętrznego. Natomiast zjawiska występujące w materiałach współpracujących elementów składowych koła i szyny (np. cząsteczek), nazywane jest tarcie wewnętrzne. Wówczas między elementami tj. cząsteczkami czy atomami ciał stałych działają siły spajające nazywane siłami spójności lub

kohezji opisane w pracach [32, 65, 66]. Intensywność działania tych sił (rys. 1.2) wpływa na zwiększenie lub zmniejszenie tarcia wewnętrznego.

Podczas toczenia się zestawu kołowego po szynie na powierzchniach styku elementów trących, ma miejsce mikroskrawanie, w niektórych przypadkach nawet wrywanie cząstek materiału koła (zjawisko dekohezji). Zjawisko to jest widoczne na powierzchni tocznej koła, natomiast przyczynami jego są grupy czynników stereometrycznych i fizykalnych [70, 71]. Przy tarciu zewnętrznym, gdy koło styka się z szyną podczas toczenia występują dodatkowo opory, wynikające z sił powierzchniowych (sił adhezji), co przedstawia rys. 1.2.

Toczący się zestaw kołowy po szynach to przypadek tarcia suchego, tylko w nielicznych przypadkach jak mokre i zabrudzone smarami lub olejem szyny może wystąpić tarcie półsuche lub półślizne [35].

Tarcie w układach mechanicznych dzieli się na niepożądane oraz tarcie pożądane wykorzystywane w sprzęgłach i w hamulcach. Toczący się zestaw kołowy po szynach stanowi tarcie niepożądane ze współczynnikiem przyczepności koła do szyny wynoszącym w zależności od prędkości toczenia od ok. 0,18 do 0,3 dla szyn suchych i od ok. 0,05 do 0,2 w przypadku szyn mokrych [18, 128].



Rys. 1.2. Modele tarcia wewnętrzne i zewnętrzne [32]

Zjawiska jakie występują w styku koła z szyną, a dokładniej oddziaływania międzycząsteczkowe w warstwie wierzchniej ciał stałych zależą od bardzo wielu czynników. Oddziaływanie tarcia w głąb materiału koła czy szyny jest bardzo małe, a na opory tarcia podczas toczenia ma zarówno wpływ stanu powierzchni, zanieczyszczenia czy skład chemiczny materiałów tworzących parę cierną w styku. Pierwszy zaproponowany model tarcia Coulomba w 1785 roku opisany równaniem (1.1) to tarcie zewnętrzne spoczynkowe tj. statyczne i dotyczy przypadku zatrzymanego zestawu kołowego na torze prostym lub pochyłym.

$$T = N \cdot \mu + A; \quad T = G \cdot \cos \alpha \cdot \mu + A, \quad (1.1)$$

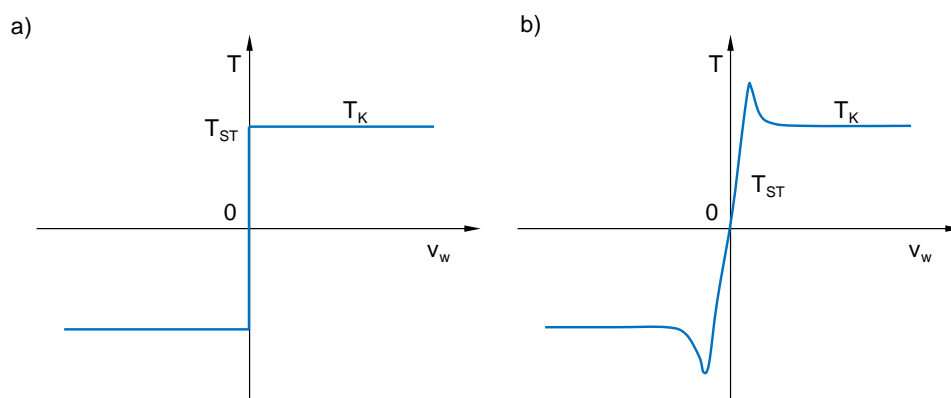
gdzie: T – siła tarcia [N],
 N – siła nacisku [N],
 G – siła ciężkości [N],
 μ – współczynnik tarcia,
 α – kąt pochylenia toru [°],
 A – siły cząsteczkowe (adhezja) [N].

Adhezyjna teoria tarcia została opisana w 1938 roku przez Bowdena i Tabora i zakłada, że styk ciał nie zachodzi na powierzchni nominalnej, a na powierzchni rzeczywistej. W strefie rzeczywistego kontaktu zachodzi zjawisko adhezji i powstają tzw. mostki zwarcia, w wyniku deformacji nierówności w styku dwóch materiałów [65]. W praktyce siły cząsteczkowe (adhezja) są małe i można je pominąć ($A=0$), wówczas zależność na współczynnik tarcia spoczynkowego (1.2) przedstawia się następująco [32]:

$$\mu = \frac{T}{N} \cdot \frac{\int_s \tau ds}{\int_s \sigma ds}, \quad (1.2)$$

gdzie: σ – naprężenia normalne na powierzchni materiału [Pa],
 τ – naprężenia ścinające [Pa].

W czasie toczenia się zestawu kołowego po szynie występuje tarcie toczone w którym prędkości obu ciał (koła i szyny) w punktach ich styku są sobie równe, a ich czas trwania (styku tych punktów) dla idealnych powierzchni dąży do zera. Tarciu tocznemu towarzyszy odkształcenie sprężyste stykających się materiałów powodujące styk strefowy na części obszaru. W strefie styku występuje tarcie zewnętrzne na granicy styku oraz tarcie wewnętrzne w odkształconej objętości warstwy wierzchniej obu materiałów [65]. Przejścia z tarcia statycznego w kinematyczne od prędkości względnej przedstawia rysunek 1.3.



Rys. 1.3. Zależność tarcia statycznego i kinematycznego od prędkości względnej: a) dla uproszczonego modelu Coulomba, b) dla układu z przejściem z tarcia T_{ST} na T_K [4]

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 1.3 a) stwierdza się, że w rzeczywistości nie występuje przypadek stałej siły tarcia od prędkości poślizgu. Badania Stribecka wykazały, że wraz ze wzrostem prędkości względnej ciał (tylko w przypadku małych prędkości poślizgu) następuje zmniejszenie siły tarcia (rys. 1.3 b). Jest to związane z występowaniem zjawiska typu stisk-slip [65], które ma miejsce w sprzęgłach i w hamulcach.

Dla zestawu kołowego siła normalna oraz reakcja normalna tworzą parę sił tj. moment oporu ruchu koła po szynie. Moment ten jest momentem tarcia tocznego, a wartość współczynnika tarcia tocznego zależy od własności sprężysto-plastycznych materiału koła i szyny oraz od wartości siły normalnej tj. obciążenia działającego na koło. W pracy [32] stwierdzono, że większa twardość stykających się ciał wpływa na mniejszą wartość współczynnika tarcia tocznego i tym samym mniejszy opór toczenia. Moment tarcia jest równoważony momentem jaki tworzy siła styczna pomnożona o średnicę koła, co przedstawia zależność (1.3).

$$M_t = N \cdot \mu_m = N \cdot \mu_{obl} \cdot D, \quad (1.3)$$

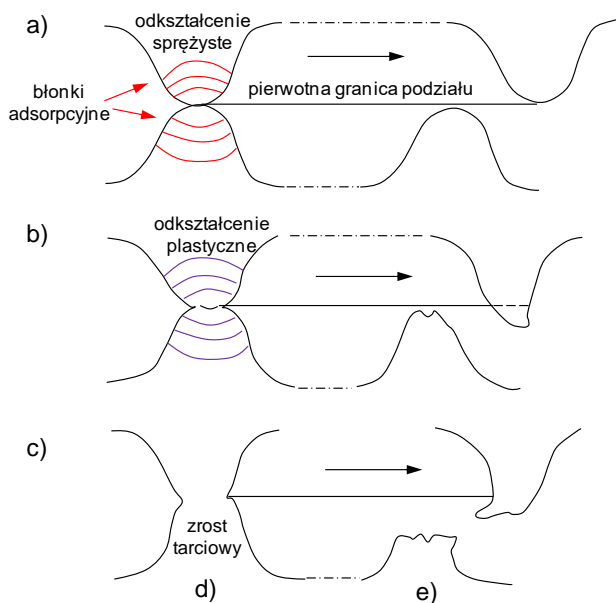
gdzie: μ_m – współczynnik tarcia tocznego w metrach,
 μ_{obl} – obliczeniowy współczynnik tarcia tocznego, $\mu_{obl}/D = \mu/D$,
 D – średnica koła w okręgu tocznym [m].

Analizując zależność (1.3) stwierdza się, że koło może toczyć się po szynie tylko wtedy gdy siła popychająca P jest równa lub większa od siły tarcia w styku koła z szyną (1.4) [66].

$$P \geq T \geq N \cdot \mu_{obl}, \quad (1.4)$$

gdzie: P – siła pchająca [N].

Wieloletnie badania w zakresie tarcia zewnętrznego w styku dwóch ciał podczas ich przemieszczania (ruchu) nie doprowadziły do opracowania ogólnej teorii tarcia suchego. Proces tarcia suchego jest procesem złożonym i zależnym od wielu czynników, na podstawie [4, 133] stwierdzono, że można je podzielić na trzy grupy teorii tj. teorię mechaniczną, molekularną i molekularno-mechaniczną.



Rys. 1.4. Typy połączeń tarcowych i ich skutki: a) połączenie adhezyjne, b) szepienie styków, c) wzrost tarcowy, d) nawiązanie styku, e) rozdzielanie styku [32]

Mechaniczne teorie tarcia suchego były jako pierwsze podawane i tłumaczone oporami jakie występują względem przesuwanego się ciał. Opory te przeciwdziałają realizowanej w tym czasie pracy, która tracona jest na unoszenie ślizgających się elementów po nierównościach powierzchni drugiego elementu. Ponadto praca również zużywana była na ścinanie nierówności i połączeń tarcowych oraz na pokonanie oporów wywołanych odkształceniami sprężystymi i plastycznymi w mikroobszarach styku, co przedstawia rysunek 1.4. Podczas styku elementów, często dochodzi do zjawiska szepienia. Jest to trwałe bezdyfuzyjne połączenie się mikroobszarów trących się ciał wywołane wiązaniami chemicznymi na pierwotnej granicy rozdziału [51]. Takimi elementami tworzącymi parę cierną, a narażonymi na chwilowe szepienie są koło i szyna.

Na początku teoria tarcia suchego tłumaczona była międzycząsteczkowym oddziaływaniem trących o siebie elementów bez uwzględnienia adhezyjnych szepień [32]. Dla przykładu mechaniczna teoria Leonarda da Vinci bazowała na tarcu zależnym od chropowatości powierzchni. Styk dwóch ciał z gładką powierzchnią odznaczał się niższą wartością współczynnika tarcia w przeciwieństwie do styku ciał z chropowatą powierzchnią. W tej teorii podany był wniosek, że dowolne ciało wykazuje przy tarcu opór równy około jednej czwartej swojego ciężaru pod warunkiem, że styk tworzy wyrównaną płaszczyznę z drugą polerowaną powierzchnią. Drugi wniosek teorii Leonarda da Vinci to siła tarcia jest niezależna od powierzchni styku.

Druga teoria tarcia suchego podana przez Amontonsa w XVII wieku wyjaśnia tarcie jako efekt wspinania się jednego ciała po nierównościach drugiego ciała pod działaniem nacisku normalnego [65, 66].

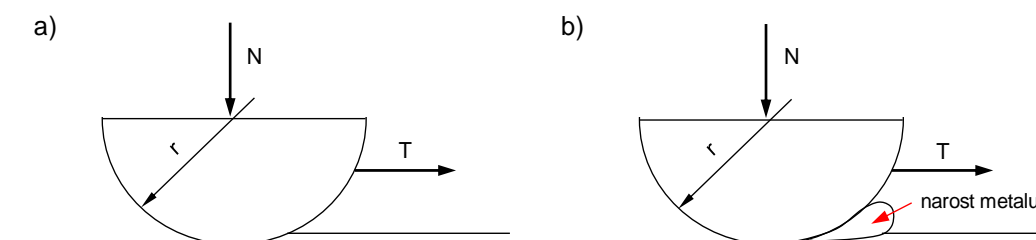
$$T = \mu \cdot N \quad (1.5)$$

Zależność Amontonsa (1.5) przedstawiana jest do dnia dzisiejszego i jest powszechnie używany w inżynierii mechanicznej, pomimo że jest niedokładna. Amontos uważał, że współczynnik tarcia μ jest niezależny od obciążenia normalnego N . Było to błędne założenie, gdyż badania Dieriagina wykazały [32], że współczynnik tarcia zależy od obciążenia i mechanicznych, geometrycznych i chemicznych właściwości powierzchni trących. W rzeczywistości wartość współczynnika tarcia wrasta przy kojarzeniu materiałów plastycznych i półplastycznych. Wówczas w wyniku oddziaływania zewnętrznego występuje odkształcenie plastyczne w styku dwóch ciał stykających i wzrasta powierzchnia rzeczywistego styku i siły adhezji. Wspomniane siły adhezji zwiększają wartość współczynnika tarcia, czego już nie uwzględnił wzór Amontonsa.

Coulomb sformułował prawo tarcia suchego w XVIII w. za pomocą równania (1.1). W jego zależności zmienna A (siły cząsteczkowe) są rozwinięciem zależności Amontonsa (1.5), w której siły tarcia zależą od molekularnego oddziaływania (tj. szczepień) powierzchni trących. Coulomb dla uproszczenia swojej zależności przyjął wartość składnika A jako stałą dla płaskich powierzchni, nie uzależniając jej od wartości nacisku normalnego oraz od chropowatości powierzchni [32].

Bowden w swojej teorii tarcia suchego postawił hipotezę o występowaniu plastycznych odkształceń rzeczywistej powierzchni styku trących się ze sobą ciał stałych. Na tej podstawie wysunął wniosek, że wartość współczynnika tarcia oraz uszkodzenia powierzchniowe jakie występują podczas tarcia są uzależnione od własności fizycznych trących się powierzchni ciał stałych [53, 65]. Praca tarcia zamieniana w ciepło, powoduje wzrost temperatury w obszarach styku, a w konsekwencji na obniżenie twardości materiału, co w efekcie zwiększa obszar styku plastycznego. Następuje wtedy szczepianie trących metali, jako bezdyfuzyjne połączenie stykających się obszarów, wskutek wiązania metalicznego w pierwotnej granicy ich rozdziału [102]. Bowden zakładał, że szczepiania między powierzchniami dwóch metali podczas tarcia występują tylko w czystym metalicznie styku, po pokonaniu fizycznej bariery wiązania metalicznego. W efekcie powstają połączenia metaliczne powierzchni elementów maszyn spowodowane zgrzewaniem lokalnych obszarów styku pod działaniem wysokiej temperatury, w wyniku tarcia lub w wyniku adhezyjnego szczepienia. Należy zaznaczyć, że teoria Bowdena nie uwzględnia molekularnego oddziaływania powierzchni, oraz wpływu chropowatości na siłę tarcia [129].

Teorię Bowdena rozwinął Epifanow, który założył, że ścięcie metalu w wyniku przesuwania jednej powierzchni po drugiej następuje nie tylko w punktach rzeczywistego styku, lecz także na powierzchni S_c kilkakrotnie przekraczającej sumaryczną powierzchnię rzeczywistego styku, co przedstawia rysunek 1.5 [32].



Rys. 1.5. Graficzna interpretacja teorii tarcia suchego Epifanowa: a) model do wyznaczenia składowej siły tarcia suchego, b) model zagłębienia i przesuwna narostu metalu podczas przemieszczania [32]

Przed przednią częścią przesuwanego się ciała tworzy się narost metalu, a ślizganie zachodzi zarówno w rzeczywistej płaszczyźnie styku oraz wewnątrz powstałego narostu [52, 134]. Wielkość rzeczywistej powierzchni ścięcia można wówczas określić badając szerokość i głębokość bruzdy powstałej w wyniku tarcia [65]. Teoria tarcia suchego wg Epifanowa przedstawia zależność (1.6), a wartość współczynnik tarcia – równanie (1.7).

$$T = \tau_o \cdot S_c + k \cdot S_c \cdot \sigma_p \quad (1.6)$$

$$\mu = \frac{\tau_o}{\sigma_p} \cdot k, \quad (1.7)$$

gdzie: τ_o – wytrzymałość na ścinanie przy $\sigma_p=0$ [Pa],
 S_c – powierzchnia ścinania [m^2],
 σ_p – naprężenia normalne w płaszczyźnie ścinania [Pa],
 k – współczynnik szybkości zmiany wytrzymałości na ścinanie przy zmianie naprężeń normalnych, wg Bridgmana $k=0,01 \div 0,1$.

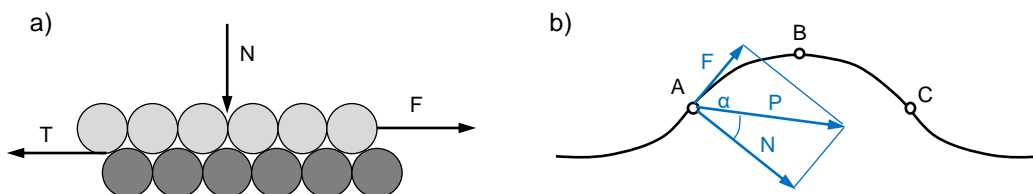
Tomlinson opracował adhezyjną teorię tarcia suchego, w której podał, że tarcie jest efektem adhezyjnego oddziaływania trących o siebie elementów. W przeciwieństwie do poprzednich teorii Tomlinson uwzględnił chropowatość powierzchni, przy przemieszczaniu się jednego ciała po drugim. Ta ciągła zmiana par cząsteczek i tworzenie się nowych wiązań molekularnych powoduje rozproszenie energii E . Zależność na wartość współczynnika tarcia wg Tomlinsona przedstawia równanie (1.8) [66].

$$\mu = \frac{E}{l \cdot P}, \quad (1.8)$$

gdzie: E – średnia energia zużywana na rozerwanie pary cząsteczek [J],
 l – odległość poszczególnych par cząsteczek [m],
 P – średnia wartość siły odpychania [N].

Na podstawie zależności (1.8) stwierdza się, że μ jest odwrotnie proporcjonalne do iloczynu siły odpychania i odległości poszczególnych par cząsteczek. Zgodnie z [97] stwierdzono, że teoria Tomlinsona jest sprzeczna z prawem Amontonsa i Coulomba, które podaje o niezmienności współczynnika tarcia przy zmiennym nacisku jednostkowym.

Teoria tarcia suchego Deriagina bazuje na występowaniu związku tarcia z molekularną chropowatością ciała zależną od struktury materiałów. Pod wpływem siły F , zgodnie z rysunkiem 1.6, górne ciało zmienia swoje położenie, a jego środek ciężkości podczas pokonywania chropowatości molekularnej opisuje krzywa ABC (rys. 1.6b).



Rys. 1.6. Graficzna interpretacja teorii tarcia suchego Deriagina: a) model oddziaływania atomów w obszarze tarcia, b) rozkład sił w obszarze styku atomów [119]

Obliczeniowy współczynnik tarcia μ_o wg Deriagina przedstawia zależność (1.9) [66].

$$\mu_o = \frac{T}{N} = \mu \left(1 + \frac{N_o}{N} \right), \quad (1.9)$$

gdzie: N_o – siły przyciągania molekularnego [N],
 μ – rzeczywisty stały współczynnik tarcia.

Siły przyciągania molekularnego N_o wg Deriagina są równe sile nacisku N tylko przy małych obciążeniach. Przy dużych obciążeniach i tym samym wzroście powierzchni styku siły N_o wzrastają proporcjonalnie do rzeczywistej powierzchni styku S_r ($N_o = p_o \cdot S_r$) [65]. Dla materiałów plastycznych rzeczywista powierzchnia styku jest wprost proporcjonalna do obciążenia normalnego, natomiast dla materiałów sprężystych wg Deriagina pole rzeczywistego styku S_r nie zależy od N a zależy od rodzaju chropowatości powierzchni. Na tej podstawie stwierdzono, że teoria nie uwzględnia własności fizycznych materiałów podczas tarcia, a duże wartości współczynnika tarcia wynikają z występowania sił adhezji. Dlatego model ten jest tylko słuszny przy idealnie gładkich powierzchniach. W nielicznych przypadkach toczącego się zestawu kołowego można założyć, że model Deriagina występuje w styku koła z szyną.

Adhezyjno-mechaniczna teoria tarcia suchego Kragielskiego zakłada występowanie siły tarcia w dwóch postaciach. Pierwsza odnosi się do rzeczywistego styku powierzchni jako źródła mechanicznego oporu ruchu spowodowanego zaczepieniem o siebie nierówności obu powierzchni. Druga postać to oddziaływanie sił molekularnych w wyniku wzajemnego przyciągania się atomów lub cząsteczek trących o siebie materiałów. Kragielski zaproponował następującą zależność na siłę tarcia i współczynnik tarcia [32].

$$T = \alpha_s \cdot S_r + \beta_s \cdot N, \quad S_r = S_{r1} + S_{r2}, \quad (1.10)$$

$$\mu = \frac{\alpha_s \cdot S_r}{N} + \beta_s, \quad (1.11)$$

gdzie: α_s, β_s – stałe współczynniki opisujące opór materiału na ścinanie,
 S_{r1} – powierzchnia styku na której występuje współoddziaływanie molekularne [m^2],
 S_{r2} – powierzchnia styku na której występuje współoddziaływanie mechaniczne [m^2].

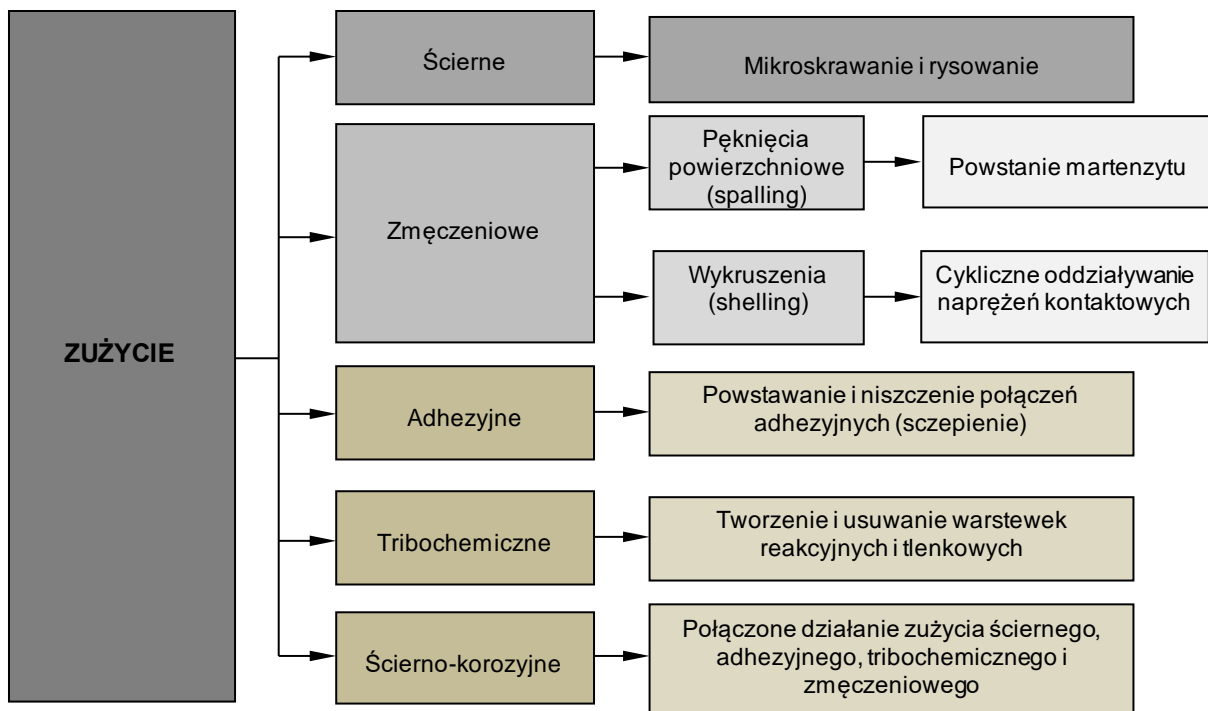
W teorii Kragielskiego podczas tarcia występuje jednoczesne przesuwanie materiału przed styk przesuwających się ciał oraz odsuwanie na boki z bruzdy zakreślonej wstępnie nierówności [32]. Podobne założenie również wystąpiło w teorii Epifanowa.

Przedstawione teorie tarcia suchego dotyczyły zjawisk tarcia w obszarach styku ślizgających się ciał, co jest przypadkiem szczególnym i rzadko występującym dla zestawu kołowego. W przypadku toczącego się zestawu kołowego po szynie model tarcia w styku koła z szyną opisują zależności (1.3) i (1.4).

Pierwszym rozpoznany sposobem zużycia kół zestawów kołowych w wyniku kontaktu z szyną było zużycie ściernie, które wyjaśniano mechanicznym oddziaływaniem styku koła podczas rozruchu i hamowania. Dalsze badania nad zjawiskami zużycia kół [5, 38, 41, 46, 62] doprowadziły do opracowania nowych następujących mechanizmów:

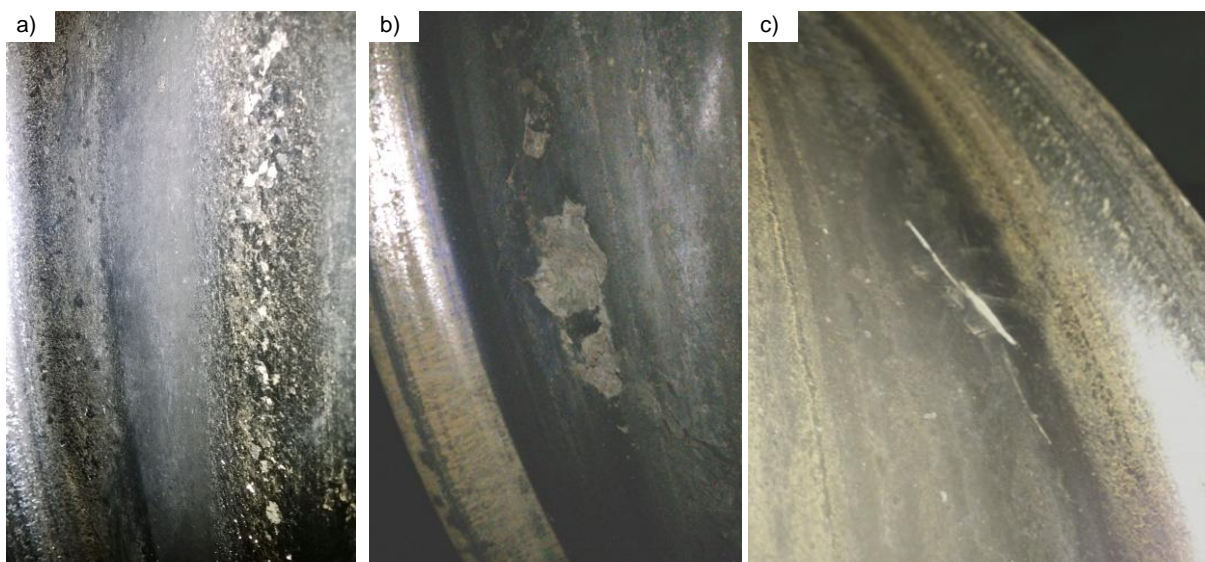
- zużycie o charakterze zmęczeniowym (spalling i shelling), powodujący utratę fragmentu (niewielkiego skrawka) powierzchni tocznej koła w wyniku powstania martenzytu podczas chwilowego nagrzania się koła wskutek tarcia podczas poślizgu (spalling) lub wskutek działania naprężeń kontaktowych (shelling) [46, 140],
- zużycie przez korozję tarciovą, uwzględniające chemiczno-mechaniczne niszczenie warstwy wierzchniej przy udziale składników substancji smarujących lub ośrodków aktywnych chemicznie.

W literaturze kolejowej z zakresu kontaktu koła z szyną rozpoznane i opisane są następujące rodzaje zużycia, co przedstawia rys. 1.7 [70, 71, 130].



Rys. 1.7. Rodzaje zużycia powierzchni kół kolejowych [70, 90]

W zestawach kołowych pojazdów szynowych, ze względu na charakter tarcia suchego powierzchni tocznej wieńca koła o szynę, występuje głównie zużycie ściernie (równomierne na całym obwodzie koła), które również może doprowadzić do powstania płaskich miejsc w czasie rozruchu i hamowania oraz zużycie zmęczeniowe w postaci wykruszeń lub pęknięć powierzchniowych. Inne rodzaje zużycia to złuszczenia na powierzchni tocznej, wybłyszczenia czy płynięcie materiału wieńca w wyniku rozwałcowania powierzchni tocznej. Ostatni przypadek występuje zarówno w czasie intensywnego rozruchu jak również podczas długotrwałego hamowania hamulcem klockowym. Przykładowe widoki różnych rodzajów zużycia powierzchni tocznej przedstawia rysunek 1.8.



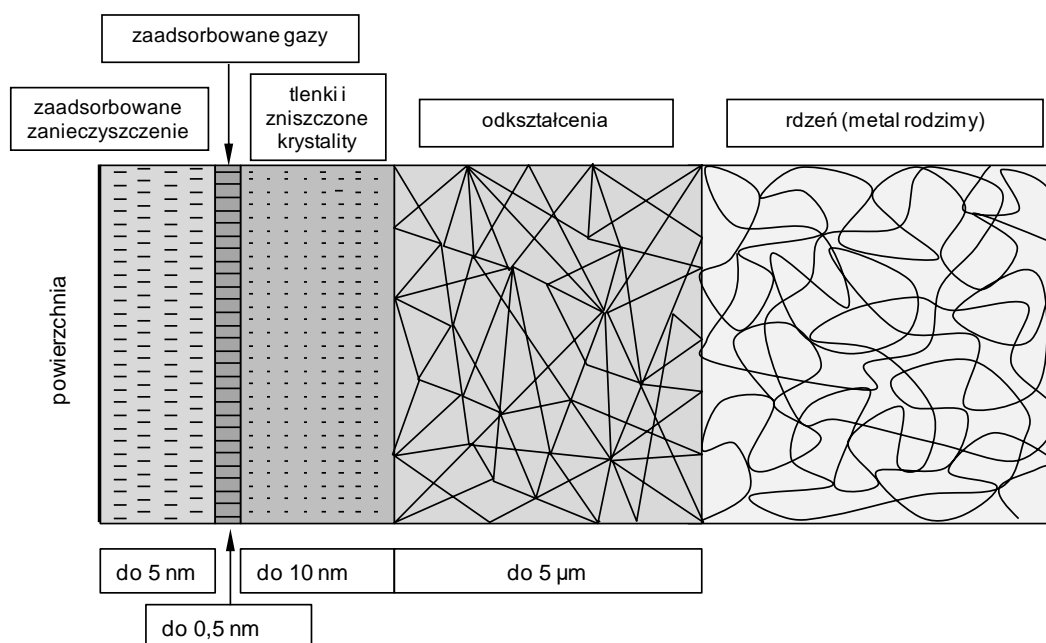
Rys. 1.8. Przykłady zużycia powierzchni kół kolejowych: a) złuszczenie, b) wykruszenie, c) pęknięcie powierzchniowe [fot. A.M. Rilo Cañas]

W przypadku przyspieszonego zużycia ściernego kół zestawów kołowych, często połączonego z innymi postaciami zużycia jak zmęczeniowe wykruszenia, czy pęknięciami na

powierzchni, prowadzone są prace w zakresie wyjaśnienia przyczyn tego zjawiska. Wówczas przeprowadza się szczegółowe analizy składu chemicznego, badania powierzchni w przekroju koła w zakresie oceny stanu warstwy wierzchniej oraz prowadzi się badania wytrzymałościowe, szeroko opisane w [1, 25, 38, 46, 120].

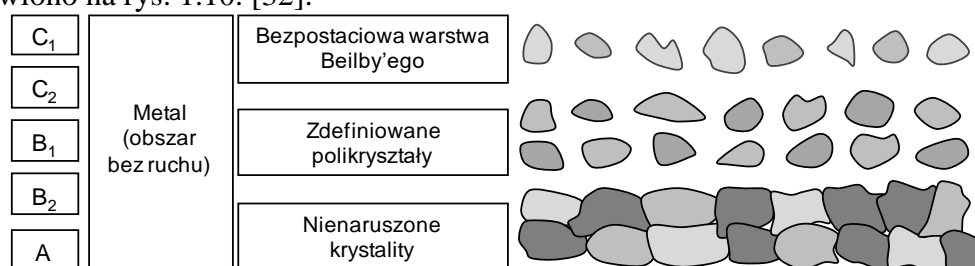
1.2. Warstwa wierzchnia wieńca koła

Zjawiska tarcia i zużycia są uzależnione przede wszystkim od stanu warstwy wierzchniej współpracujących (trących o siebie) elementów. Z dużym uogólnieniem warstwę wierzchnią elementów pary ciernej definiuje się jako zbiór punktów materialnych zawartych między jego powierzchnią zewnętrzną, a powierzchnią umowną, będącą granicą zmian wartości cech stref podpowierzchniowych powstałych na skutek wymuszeń zewnętrznych [129]. Pozostała część warstwy wierzchniej stanowi rdzeń (metal rodzimy). Na rysunku 1.9 przedstawiono przekrój przez warstwę wierzchnią elementu po obróbce mechanicznej.



Rys. 1.9. Uproszczony model budowy warstwy wierzchniej elementu po obróbce mechanicznej [32]

W rzeczywistości w warstwie wierzchniej poszczególne strefy przechodzą płynnie bez obserwacji granic. Brak obserwacji rozdziału poszczególnych stref warstwy wierzchniej również obserwuje się po procesach technologicznych związanych z wytwarzaniem danego gatunku stali np. na koła kolejowe [65]. Zarówno procesy eksploatacyjne jak i technologiczne wpływają na zmiany własności fizycznych lub chemicznych materiałów metalicznych. W styku koła z szyną w przypadku tarcia suchego, stwierdza się występowanie stref C, B i A na skutek odształceń sprężystych i plastycznych wywołanych zgniotem przez działanie siły normalnej oraz siły stycznej (siły tarcia). Model fizyczny budowy warstwy wierzchniej przedstawiono na rys. 1.10. [32].



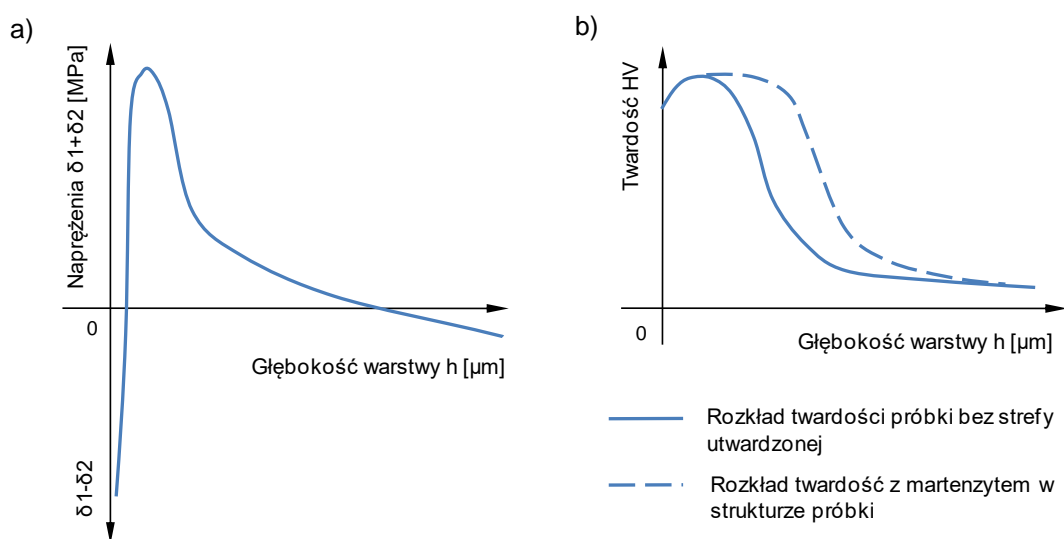
Rys. 1.10. Model fizyczny warstwy wierzchniej elementu po obróbce mechanicznej [32]

Na podstawie prac [1, 102] analizując model fizyczny przedstawiony na rysunku 1.10, strefę C warstwy wierzchniej tworzy warstwa Beilby'ego, która odznacza się bezpostaciową budową materii. Natomiast kolejną strefę C_1 stanowi warstewka tlenków metalu, która powstaje wskutek reakcji chemicznych tlenu z powierzchnią metalu. W większości przypadków strefa tlenków na powierzchni metalu stanowi warstwę ochronną i działa samohamująco na procesy korozji metali. Należy podkreślić, że strefy absorbowane na powierzchni metalu i strefa tlenków również mogą powodować obniżenie granicy plastyczności oraz zmniejszenie pasm poślizgu materiału warstwy wierzchniej.

W strefie B_1 warstwy wierzchniej znajduje się metal odkształcony plastycznie i stekstrowany, a w strefie B_2 – tylko odkształcony plastycznie. W przypadku strefy B_1 , obserwuje się wyróżnione statystycznie zorientowanie krystalitów z punktu widzenia ich elementów sieciowych. Jest to wynikiem jednokierunkowego działania sił odkształcających plastycznie materiał warstwy wierzchniej. Ostatnią strefę A warstwy wierzchniej stanowi materiał rdzenia [32].

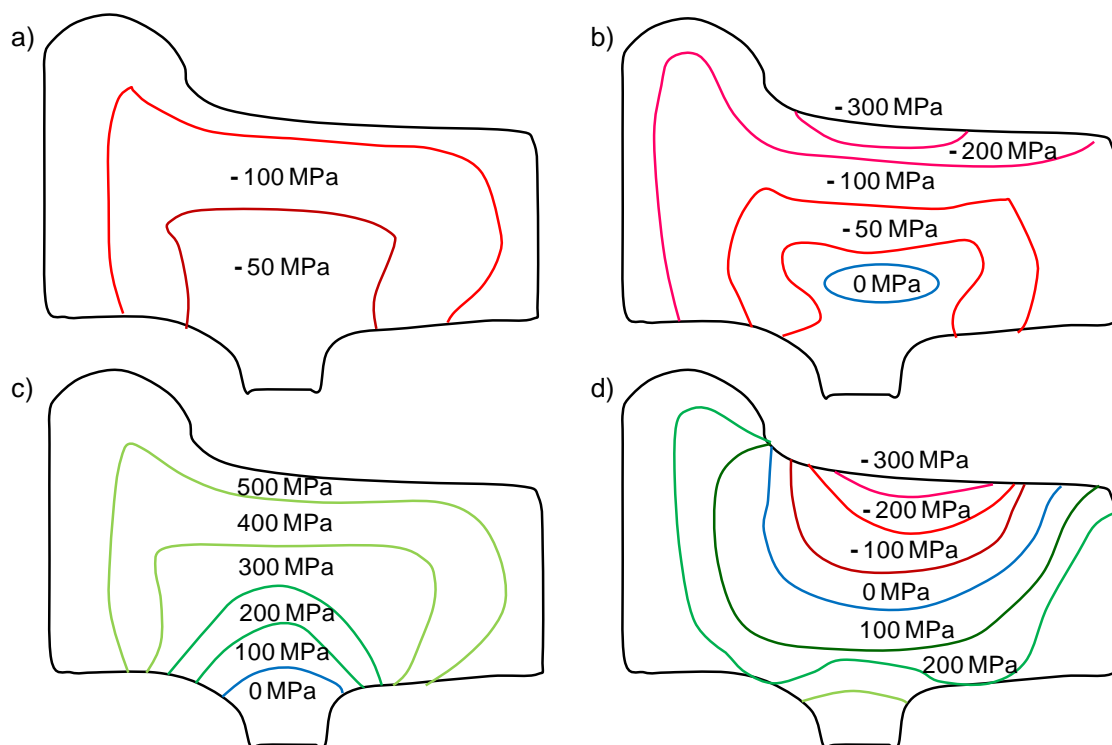
Na wartość i znak naprężeń własnych w warstwie wierzchniej mają bezpośredni wpływ zmiany obciążenia i temperatura. W szczególności gradient temperatury powoduje różną rozszerzalność cieplną materiału oraz przemiany strukturalne, co w przypadku koła, na którego powierzchnię wieńca działa klocek hamulcowy, ma istotne znaczenie na zmiany naprężeń własnych.

Na rysunku 1.11 przedstawiono rozkład naprężeń w przekroju poprzecznym warstwy wierzchniej między zewnętrzną i wewnętrzną jej granicą po obróbce skrawającej [32]. W wyniku deformacji i odkształceń warstwy wierzchniej oraz oddziaływania poszczególnych jej stref, zmieniają się własności wytrzymałościowe. W szczególności dotyczy to zmiany twardości, co przedstawiono na rysunku 1.11 b). Analizując wykres na rysunku 1.11 b) stwierdza się, że do pewnej głębokości warstwy od powierzchni ciała twardość wzrasta, a po osiągnięciu wartości maksymalnej, twardość zaczyna najpierw gwałtownie spadać. Od pewnej głębokości spadek ten jest łagodny i dąży asymptotycznie do wartości stałej w rdzeniu materiału. Ta wartość twardości odpowiada twardości materiału w całej objętości [31]. Należy zaznaczyć, że wartość maksymalna twardości może być przesuwana i utrzymana w kierunku głębokości materiału w przypadku wystąpienia struktury z twardym martenzytem [46].



Rys. 1.11. a) Rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbki [85], b) Rozkład twardości w warstwie wierzchniej próbki [32, 46]

Toczący się zestaw kołowy po szynie w wyniku działania siły normalnej narażony jest na występowanie naprężeń ściskających w przekroju wieńca koła. Na rysunku 1.12 przedstawiono rozkład naprężeń własnych w przekroju poprzecznym wieńca koła w różnych przypadkach użytkowania zestawu kołowego.



Rys. 1.12. Rozkład naprężeń własnych wieńca koła, a) nowego, b) po przebiegu 200 000 km, c) po hamowaniu, d) po hamowaniu i dalszej eksploatacji [102]

W dłuższej eksploatacji dochodzi do powstania zgniotu w warstwie wierzchniej [31]. Zestawy kołowe z hamulcem klockowym dodatkowo narażone są na działanie strumienia ciepła w wyniku hamowania wagonu lub innego pojazdu trakcyjnego. Efektem tego procesu jest występowanie naprężeń rozciągających, które prowadzą do powstawania pęknięć zmęczeniowych. Zmienność tego zjawiska prowadzi do narastania zgniotu w warstwie wierzchniej wieńca i powstania obwodowych naprężeń ściskających z naprężeniami rozciągającymi w wyniku występowania gradientu temperaturowego od procesu hamowania [129].

Koncentracja naprężeń w wieńcu kół powstaje w wyniku nagrzewania się stref przy powierzchniowych, w szczególności podczas hamowania i rozruchu z zerwaniem styku koła z szyną. Cykliczne nagrzewanie i chłodzenie koła w wyniku dalszej jazdy po hamowaniu powoduje zmianę naprężeń z rozciągających na ściskające, a w chwili przekroczenia granicy wytrzymałości, na powierzchni koła powstają mikropęknięcia. Jest słuszne w przypadku kół monoblokowych [129].

W literaturze zagadnienia, stan warstwy wierzchniej jest opisywany m.in. przez S. Nosala i M. Hebdę w pracach [32, 65] za pomocą parametrów stanu powierzchni S_p oraz parametrów stanu stref podpowierzchniowych S_{sp} . Do grupy parametrów stanu powierzchni zalicza się najczęściej chropowatość powierzchni (parametr R_a lub R_z), falistość powierzchni f , strukturę stereometryczną powierzchni R_s , profil powierzchni R_p oraz powierzchniowy i liniowy udział nośny N_p i N_t , co przedstawia zależność (1.12):

$$S_p = \langle R_a, R_z, f, R_s, R_p, N_p, N_t \rangle \quad (1.12)$$

W zestawach kołowych ze względu na współpracę wieńca koła z szyną, stan powierzchni warstwy wierzchniej opisywany jest najczęściej chropowatością powierzchni oraz falistością w przekroju poprzecznym. Wyższa chropowatość wpływa na podwyższenie współczynnika tarcia μ , jednak ma to miejsce tylko w przypadku nowych kół lub kół po przetoczeniu na tokarce (reprofilacja powierzchni tocznej). Po pewnym przebiegu stwierdza się obniżenie i ustabilizowanie na określonym poziomie chropowatości powierzchni tocznej koła. W przypadku falistości powierzchni, w przypadku kół kolejowych należy ją odnieść do przekroju poprzecznego wieńca koła, gdzie w wyniku eksploatacji dochodzi do zużycia powierzchni tocznej w miejscu współpracy z szyną. Falistość powierzchni tocznej koła wówczas nie odpowiada wymaganemu profilowi wieńca koła i wymusza przetoczenie na kolejny wymiar naprawczy [58]. Kolejnym czynnikiem decydującym o stanie powierzchni zarówno kół jak i szyn są zanieczyszczenia i zawiłocenia. W przypadku zestawów kołowych współpracujących z hamulcem klockowym, można wysunąć ogólne stwierdzenie, że klocek hamulcowy spełnia funkcję czyszczącą [89], co sprawdzało się w przypadku klocków żeliwnych. Od wielu lat klocki żeliwne zostały zastąpione klockami z materiału organicznego typu *K*, *L* lub *LL* i proces czyszczący koło nie jest już tak skuteczny. Do zbioru stref podpowierzchniowych zalicza się takie parametry jak naprężenia własne w warstwie wierzchniej δ , mikro i makrotwardości stref podpowierzchniowych warstwy wierzchniej *H*, struktura materiału S_T , fragmentacja krystalitów *F*, tekstura krystalitów *T*, własności chemiczne *C*, stan energetyczny powierzchni E_p , jakość materiału W_m i grubość warstwy wierzchniej *h* zgodnie z zależnością (1.13) [65]:

$$S_{sp} = \left\langle \delta, H, S_T, F, T, C, E_p, W_m, h, \vec{G} \right\rangle \quad (1.13)$$

Ostatni z parametrów stanu stref podpowierzchniowych to gradient zmian parametrów stref podpowierzchniowych \vec{G} , który określa przyrost poszczególnych parametrów S_{sp} względem grubości warstwy wierzchniej *h* zgodnie z równaniem (1.14):

$$\vec{G} = \left\{ \frac{d\delta}{dh}; \frac{dH}{dh}; \frac{dS_T}{dh}; \frac{dF}{dh}; \frac{dC}{dh}; \frac{dW_m}{dh} \right\} \quad (1.14)$$

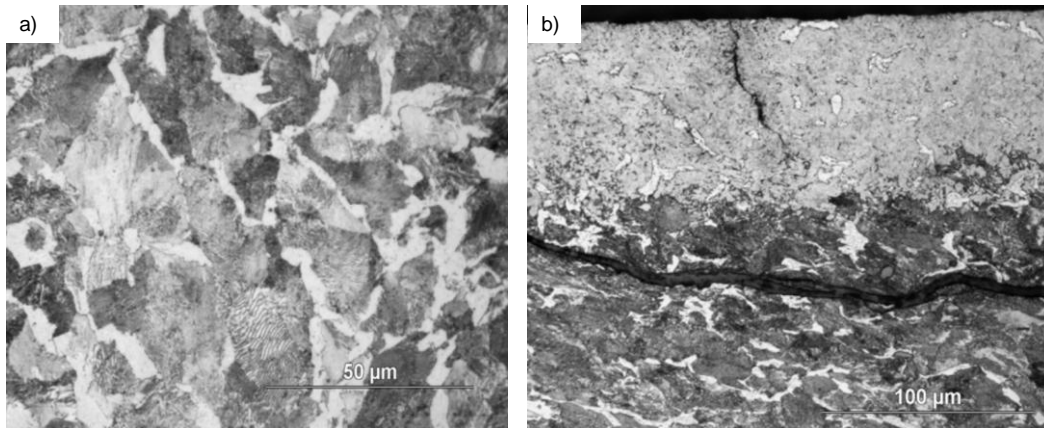
Warstwa wierzchnia koła i szyny opisywana jest zbiorem parametrów, których wartości zależą od własności skojarzonych materiałów w ich styku i warunków tworzenia się warstwy w czasie eksploatacji (toczenie kół po szynach). Dlatego stan warstwy wierzchniej Z_n wpływa na zużycie jednego ze skojarzonych elementów (najślabszego z punktu materiałowego) i w uproszczony sposób jako funkcja zależna od poszczególnych parametrów zużycia opisywany jest równaniem (1.15) [32]:

$$Z_n = f(p, v, T, M, S_n, S_t), \quad (1.15)$$

gdzie: *p* – nacisk jednostkowy (uzależniony od rzeczywistej powierzchni styku koła z szyną) [Pa],
v – względna prędkość poślizgu,
T – temperatura strefy kontaktu [°C],
M – rodzaj materiału koła (właściwości fizykomechaniczne),
S_n – stan warstwy wierzchniej koła jako funkcja warunków i czasu pracy,
S_t – stan warstwy wierzchniej szyny jako funkcja parametrów stereometrycznych powierzchni.

Stan warstwy wierzchniej jak i jej właściwości na przykładzie powierzchni tocznej koła czy szyny, zależą zarówno od procesów technologicznych i późniejszych procesów eksploatacyjnych. Proces technologiczny wykonania np. koła kolejowego ma wpływ na występowanie zanieczyszczeń oraz wtrąceń metalicznych i niemetalicznych, opisanych w

pracach [70, 71]. W wyniku nacisku koła do szyny oraz kontaktu koła z klockiem hamulcowym dodatkowo występuje zjawisko przenoszenia materiału, o czym dowodzą przeprowadzone badania [46]. Prace w tym zakresie prowadzone dotyczą identyfikacji i dokładniejszego opisu zjawisk wpływających na zmiany właściwości warstwy wierzchniej. Badania określające wpływ warstwy wierzchniej oddziaływania jednego materiału (np. szyny) na drugi (koło) prowadzone są dwutorowo, tj. w zakresie technicznym i fizycznym. Osobnym zagadnieniem jest modelowanie i symulacje numeryczne zachowania się warstwy wierzchniej. W literaturze znane są już modele fenomenologiczne naturalnej warstwy wierzchniej, modele jednopowłokowe i wielopowłokowe opisane w pracach [31, 120]. Opisane w literaturze modele warstwy wierzchniej służą do obliczenia (oszacowania) wartości naprężeń normalnych i stycznych oraz do wyznaczenia rozkładu granicy plastyczności w materiale warstwy wierzchniej wykonując symulacje komputerowe [102]. Natomiast podsumowując należy wyciągnąć wniosek, że właściwości warstwy wierzchniej elementów w największym stopniu zależą od stanu naprężeń własnych [1, 129]. Mechanizm ich powstawania jest złożony i zależy od wielu czynników, ale zależy głównie od wielkości zgniotu i temperatury wywołującą przemiany fazowe.



Rys. 1.13. Struktura próbek koła z powierzchni toczonej, a) siatka ferrytu na granicach perlitu, b) drobnoziarnisty martenzyt [46]

Przyrost temperatury w miejscu styku powoduje nagły wzrost naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej, a w przypadku dużych sił tarcia np. podczas rozruchu i zerwania styku koła z szyną, może prowadzić do uzyskania wartości zbliżonych granicy plastyczności w danej temperaturze materiału koła. Podgrzany fragment materiału koła w chwili stygnięcia zaczyna początkowo kurczyć się (temperatura przemiany austenit–martenzyt), a następnie zwiększa swoją objętość ok. 2% (przemiana $\gamma \rightarrow \alpha$). Jest to przemiana martenzytyczna (rys. 1.13b), która zachodzi w warstwie podpowierzchniowej zwiększając swą objętość. W wyniku powolnego procesu przemiany strukturalnej, strefy położone głębiej stygną wolniej i rozciągają materiał położony poniżej warstwy podpowierzchniowej. Jest to efektem dodatkowego ściskania materiału położonego bezpośrednio pod powierzchnią kontaktu. Powstałe naprężenia rozciągające (poniżej kontaktu styku koła z szyną) i ściskające (na powierzchni kontaktu) sumują się, czego efektem są naprężenia wynikowe, które zależą głównie od właściwości materiału koła i charakteru kontaktu.

1.3. Miary zużycia kół kolejowych

W ocenie procesu zużycia, najczęściej stosuje się pojęcie intensywności zużycia I opisywanej ubytkiem objętościowym lub masowym, czasami również liniowym odniesionym do jednostki czasu, drogi tarcia lub pracy tarcia. Jest to ocena w ujęciu ilościowym, a w

przypadku pojazdów szynowych zużycie kół kolejowych odnosi się do czasu użytkowania lub do przebytej drogi (przebieg pojazdu) do kolejnego przeglądu. Czasami dodatkowo, lub tylko, dokonuje się oceny porównawczej jako zużycie względne Z_{wz} , będące oceną jakościową. Jest to wielkość bezwymiarowa wyznaczana stosunkiem zużycia materiału koła zmierzonego w czasie t_2 do zużycia materiału tego samego koła w czasie t_1 lub w czasie t_1 do stanu koła nowego t_0 (przed rozpoczęciem pracy), bardzo często podawane w procentach jako przyrost zużycia (zależność (1.16)).

$$Z_{wz} = 100 \left| \frac{D_{t1}}{D_{t0}} - 1 \right|, [\%] \quad (1.16)$$

$$Z_{bz} = \frac{D_{t0}}{2} - \frac{D_{t1}}{2}, [mm], \quad (1.17)$$

gdzie: D_{t1} – średnica koła po czasie t_1 [m],
 D_{t0} – średnica koła w czasie t_0 (przed użytkowaniem) [m].

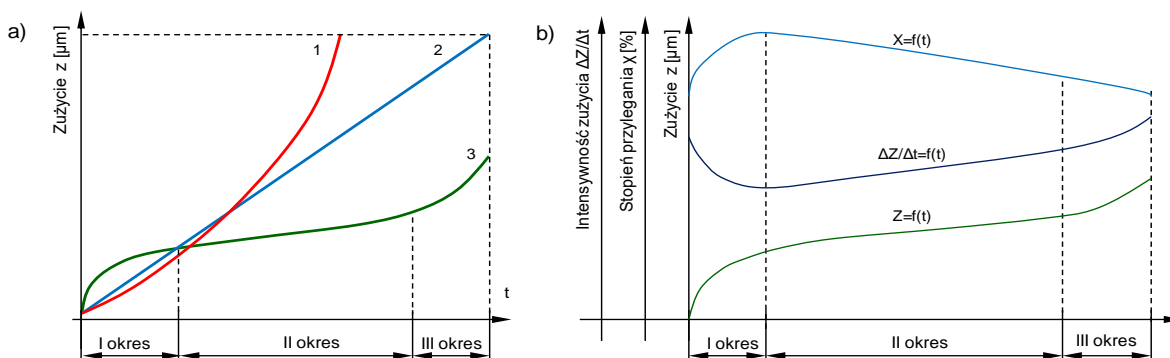
W kolejnictwie częściej wykorzystuje się miary bezwzględne zużycia zestawów kołowych czy szyn (równanie 1.17) na podstawie pomiarów na średnicy koła między dwoma okresami czasowymi.

Objętościową odporność na zużycie (w odniesieniu do drogi tarcia) przy założeniu stałych wartości wzorcowych określonych współczynnikami, oblicza się z równania (1.18) [1]:

$$I_{oz} = \frac{U}{L} = c \frac{Ndx}{Hy} \left[\frac{m^3}{m} \right], \quad (1.18)$$

gdzie: U – ubytek objętościowy materiału [m^3],
 L – droga tarcia [m],
 N – nacisk jednostkowy (obciążenie normalne),
 c – współczynnik proporcjonalności,
 d – średnica cząstek ścierających się, mierzona prostopadle do kierunku ruchu,
 x – stosunek liczby cząstek ścierających do ogólnej liczby cząstek,
 H – twardość Vickersa,
 y – współczynnik względnej liczby cząstek przenoszących obciążenie.

W literaturze z zakresu trybologii [65] zużycie części maszyn przedstawia się w postaci krzywych zużycia, co przedstawia rys. 1.14. Ze względu na fizyczny kontakt i proces tarcia między współpracującymi elementami proces zużycia zawsze będzie wzrastał z różną intensywnością w funkcji czasu eksploatacji. Typową charakterystyką zużycia jest krzywa Lorentza, w której występują przypadki przebiegu jako proces ustabilizowany, cechujący się stałą intensywnością lub jako proces nieustabilizowany z intensywnością zmienną.



Rys. 1.14. a) Krzywe zużycia, b) Przebieg zużycia [59]: 1- proces nieustabilizowany, 2- proces ustabilizowany w całym okresie, 3- proces ustabilizowany z intensywnością zmienną (krzywa Lorentza),

Proces zużycia w pojazdach szynowych czy samochodowych współpracujących ze sobą części w wyniku tarcia dzieli się na trzy okresy (rys. 1.14). Pierwszy okres to docieranie, podczas którego zachodzi proces przejścia od stanu wyjściowego powierzchni i warstwy wierzchniej do stanu odpowiadającego warunkom tarcia. W tym okresie ulegają zużyciu przede wszystkim wierzchołki nierówności powierzchni po obróbce wykańczającej w procesie wykonawczym. Intensywność zużycia jest duża na początku i maleje ostatecznie do wartości w przybliżeniu stałej na końcu tego okresu [1]. Drugi okres to zużycie ustabilizowane, w którym intensywność zużycia jest w dużym przybliżeniu stała, co przedstawia zależność (1.19) [1, 32]:

$$I = \frac{\Delta Z}{\Delta t} \approx const. \quad (1.19)$$

Ostatni trzeci okres to przyspieszone zużycie, w którym gwałtownie rośnie intensywność zużycia. W pierwszym okresie podczas docierania się współpracujących ze sobą części, przebieg krzywej Lorentza (zużycie Z) opisywany jest funkcją logarytmiczną (1.20) [4]:

$$Z = a \cdot \ln(t) \quad (1.20)$$

W drugim okresie tj. zużycia ustabilizowanego, występującego podczas właściwej eksploatacji, krzywa jest funkcją liniową (1.21) [66]:

$$Z = a \cdot t + b \quad (1.21)$$

W ostatnim trzecim okresie, przyspieszonego zużycia, krzywą Lorentza opisuje równanie potęgowe (1.22) [65]:

$$Z = a \cdot t^b, \quad (1.22)$$

gdzie: t – czas, jako zmienna niezależna,
 a, b – stałe funkcji.

W przypadku zużycia z intensywnością stałą (krzywa 2 na rys.1.14 a), zużycie jest wprost proporcjonalne do czasu [4] i krzywa ta opisywana jest równaniem (1.23):

$$Z = a \cdot t \quad (1.23)$$

Jest to typowy przypadek dla zużycia ściernego, mającego miejsce w styku koła z szyną, w parze ciernej hamulca tarczowego czy klockowego, przy określonych warunkach pracy i w przedziale czasu. Autor pracy [70] po wieloletnim badaniu zużycia wieńców kół 20 lokomotyw serii EU07/EP07 do przebiegu 250 tys. km również uzyskał zależność liniową zużycia kół w funkcji przebiegu, co przedstawia równanie (1.24).

$$Z_D(p) = 2,6 \cdot 10^{-5} \cdot p_{km} \quad (1.24)$$

gdzie: Z_D – zużycie wieńca koła lokomotywy [mm],
 p_{km} – przebieg pojazdu [km].

Na podstawie równania (1.24) stwierdza się, że po uzyskaniu przebiegu lokomotywy wynoszącego 100 tys. km, zużycie na średnicy koła wyniesie 2,6 mm.

W przypadku nieustabilizowanego procesu zużycia z intensywnością zmienną (krzywa 1 na rys. 1.14a), który cechuje się krótkim czasem pracy obiektu, krzywa zużycia opisywana jest równaniem (1.20), jak w przypadku ostatniego (trzeciego) okresu procesu ustabilizowanego.

W pojazdach szynowych, jeżdżących na różnych szlakach kolejowych (teren nizinny, górski) z różną liczbą łuków o różnych promieniach, hamowanych z różną intensywnością hamulcem klockowym lub innym nie oddziaływującym na koła, nie jest możliwe założenie liniowego zużycia wieńca koła. Taki przypadek zużycia (krzywa 3 na rys. 1.14 – II okres lub krzywa 2 – wszystkie okresy) również występuje o czym dowodzi praca [70]. Jest to możliwe

przy stałych warunkach użytkowania pojazdów oraz przy niezmiennym obciążeniu gdy pojazdy trakcyjne lub wagony kursują na tych samych szlakach. Wagony towarowe przeznaczone do komunikacji międzynarodowej są eksploatowane w różnych warunkach, przez co zużycie koła jest zmienne, często ma charakter nieliniowy (krzywa 1 na rys.1.14) i opisywane równaniem (1.20). W celu zmniejszenia przyrostu zużycia kół, co mogłoby prowadzić do wykolejenia pojazdu ze względu na występowanie płaskich miejsc na powierzchni tocznej, w szczególności w ruchu międzynarodowym oraz na głównych szlakach kolejowych, dokonuje się punktowych pomiarów płaskich miejsc i również gorących hamulców czy łożysk. Realizowane jest to przez diagnostyczny (stacjonarny) system ASDEK [30] oraz inne systemy opisane w pracach [120, 138].

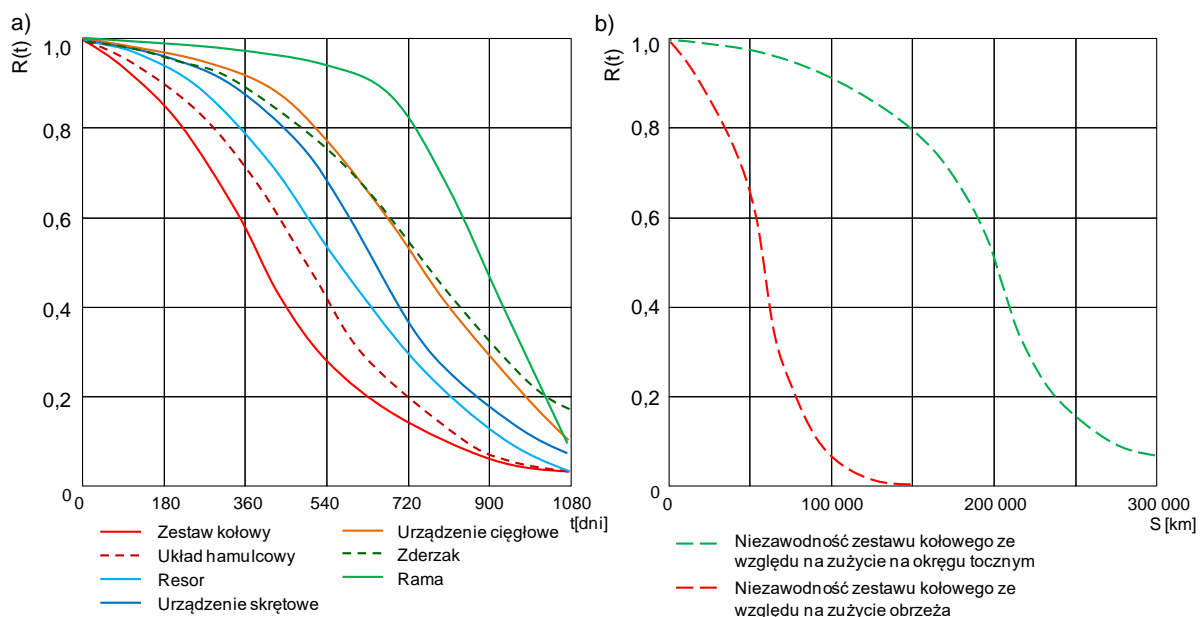
1.4. Ocena zużycia kół zestawów kołowych

Przeprowadzone badania eksploatacyjne [52, 70, 71, 131] w zakresie układu biegowego pojazdów szynowych dowodzą, że najszybciej zużywającym się zespołem jest powierzchnia koła zestawu kołowego wynikająca z kontaktu z szyną. Na rysunku 1.15 przedstawiono graficzną zależność niezawodności $R(t)$ od czasu eksploatacji dla poszczególnych elementów układu biegowego oraz niezawodności zestawu kołowego użytkowanego na terenie górzystym w odniesieniu do przebiegu.

Na podstawie wykresu przedstawionego na rysunku 1.15b) stwierdzono, że zestaw kołowy pojazdu szynowego eksploatowanego w terenie górzystym podlega przyspieszonemu zużyciu, ze względu na podcięcie obrzeża co bardziej dominuje niż zużycie na powierzchni tocznej. Intensywności zużycia obrzeża koła I_{ZO} wyznaczana jest z zależności Neumanna (1.25) [71]:

$$I_{ZO} = \frac{2 \cdot P_k \cdot \alpha}{D} \cdot \frac{\mu}{\sin \gamma \cdot \cos \gamma}, \quad (1.25)$$

gdzie: P_k – siła kierująca [N],
 α – kąt nabiegania koła na szynę [°],
 D – średnica koła [m],
 μ – współczynnik tarcia między obrzeżem a szyną,
 γ – kąt pochylenia obrzeża koła [°].

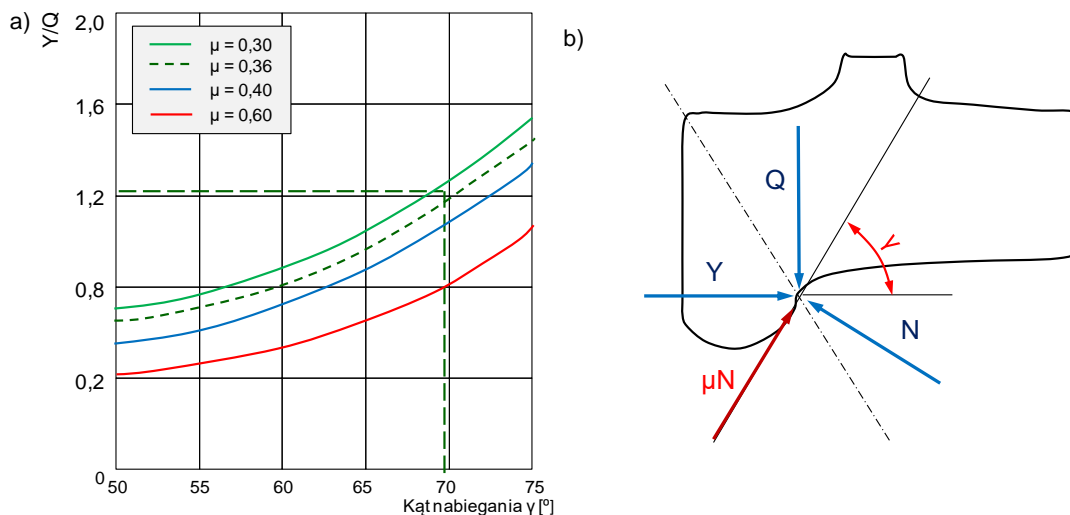


Rys. 1.15. Funkcja niezawodności $R(t)$ [71]: a) elementów układu biegowego, b) zestawu kołowego użytkowanego w terenie górzystym

Na podstawie zależności (1.25) stwierdza się, że na zużycie obrzeża bezpośredni wpływ ma siła kierująca (również nazywana siłą poprzeczną lub prowadzącą Y), kąt nabiegania oraz współczynnik tarcia między obrzeżem a szyną. Natomiast wraz ze wzrostem średnicy koła zmniejsza się intensywność zużycia obrzeża. Dlatego wiele pojazdów posiada urządzenia do smarowania skrajnych zestawów kołowych w lokomotywach i zespołach trakcyjnych, które jako pierwsze nabiegają na daną szynę podczas ustawiania się do jazdy w łuku. Tego typu urządzenia zmniejszają intensywność zużycia obrzeży kół zestawów kołowych. Należy podkreślić, że wymienione zmienne (P , D , α , μ , γ) decydujące o zużyciu obrzeża, nie mogą być analizowane i zmieniane osobno gdyż związane są z drugim bardzo ważnym pojęciem w kolejnictwie nazywanym kryterium bezpieczeństwa przed wykolejeniem. Jest to kryterium, które zostało jako pierwsze zaproponowane przez Nadala i opisane zależnością ilorazu siły prowadzącej Y do siły pionowej Q , co przedstawia równanie (1.26) [97].

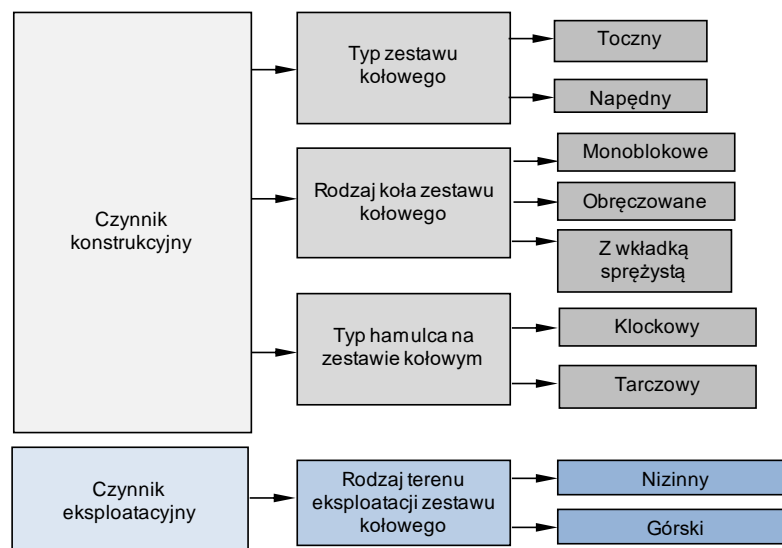
$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg} \gamma - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \gamma} \quad (1.26)$$

Na podstawie zależności (1.26) nazywanej również współczynnikiem bezpieczeństwa przed wykolejeniem wynika, że jest on zależny od współczynnika tarcia μ oraz od kąta pochylenia obrzeża γ , co również ma wpływ na zużycie obrzeża koła. Na podstawie długoletnich badań opisanych w pracach [6, 19, 37] przyjęto kąt pochylenia obrzeża wynoszący 70° , a współczynnik tarcia 0,36, co po wstawieniu do zależności (1.26) pozwala na wyznaczenie kryterium bezpieczeństwa Y/Q wynoszącego 1,2.



Rys. 1.16. a) Zależność funkcji Y/Q od współczynnika tarcia oraz kąta pochylenia obrzeża koła, b) Układ sił działających w styku koła z szyną [97]

Należy zaznaczyć, że przyjęta wartość współczynnika bezpieczeństwa przed wykolejeniem 1,2 nie gwarantuje niewykolejenia pojazdu szynowego, gdyż na podstawie badań [97, 98] zdarzały się nieliczne przypadki współczynnika tarcia wynoszącego 0,6 obniżającego kryterium bezpieczeństwa do poziomu 0,81. Graficznie przedstawiono to na rysunku 1.16 wraz z układem sił działających w styku obrzeża z szyną. Na wzrost współczynnika tarcia, który zarówno ma przełożenie na wykolejenie pojazdu szynowego jak i na zużycie obrzeża koła wpływają warunki klimatyczne tj. wysoka temperatura powietrza, niska względna wilgotność powietrza oraz mała prędkość podczas jazdy przez rozjazdy kolejowe lub przez tory o małych łukach lub przez tory zużyte na których występuje ograniczenie prędkości. Prowadzi to do wspinania się koła po szynie i wykolejenie zestawu kołowego z toru.



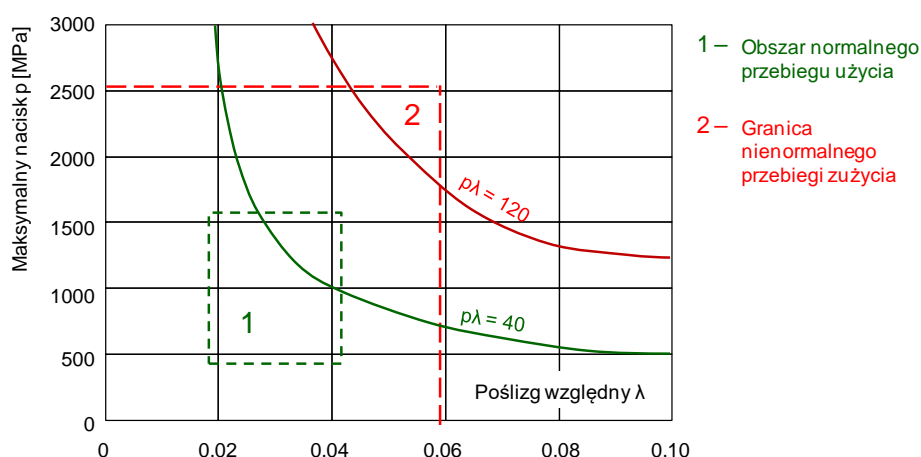
Rys. 1.17. Schemat czynników konstrukcyjno-eksploatacyjnych wpływający na trwałość kół zestawów kołowych [71, 52, 131]

Na proces zużycia kół mają wpływ dwie przyczyny. Pierwsza związana jest ze zmianą zarysu zewnętrznego powierzchni tocznej koła, co przekłada się na zmianę własności biegowych pojazdu i obniżenie kryterium bezpieczeństwa przed wykolejeniem. Druga przyczyna to ubytki (wykruszenia) materiału koła, które wymuszają przetoczenia kół.

W ocenie trwałości kół zestawów kołowych należy również uwzględnić czynniki konstrukcyjne i użytkowe, które graficznie przedstawione zostały na rysunku 1.17.

Z grupy czynników konstrukcyjnych, zestawy kołowe z hamulcem tarczowym cechują się większą trwałością względem zestawów kołowych hamowanych hamulcem klockowym. Obszar użytkowania jak tereny nizinne o małej liczbie łuków lub łukach o dużych promieniach również wpływają na ich trwałość.

Według autorów pracy [70] zużycie kół jest wprost proporcjonalne do energii dysypowanej podczas pokonywania oporów toczenia i jest definiowane przez poślizg względny λ i nacisk p w styku koła z szyną. Na rysunku 1.18 przedstawiono przebiegi iloczynu $p\lambda$ dla prawidłowego i nieprawidłowego procesu zużycia kół.



Rys. 1.18. Zależność nacisku koła do szyny od względnego poślizgu [46]

Na podstawie rysunku 1.18 stwierdza się, że krzywa $p\lambda=40$ to granica pomiędzy prawidłowym (normalnym), a nietypowym zużyciem powierzchni tocznej kół. Natomiast krzywa $p\lambda=120$ to już granica przejścia z bardzo intensywnego do krytycznego zużycia powierzchni tocznej [46].

Na zużycie powierzchni tocznej kół największy wpływ ma kontakt koła z szyną i związane z tym zużycie ściernie. Dodatkowy wpływ na nie ma również zastosowanie hamulca klockowego działającego bezpośrednio na koło. Na drugim miejscu wpływu na przyrost zużycia zestawu kołowego jest podcięcie obrzeża, szczególnie występujące w czasie eksploatacji w terenie górskim na łukach o małych promieniach. Inne postacie zużycia kół to płaskie miejsca i narosty występujące podczas niekontrolowanego rozruchu z zerwaniem styku koła z szyną lub poślizg na zablokowanych kołach w czasie hamowania. Również w tej grupie należy wymienić wykruszenia zmęczeniowe powierzchni tocznej będące efektem naprężeń kontaktowych koła z szyną. Do pozostałych rzadziej występujących postaci zużycia kół kolejowych należy wymienić owalizację koła która ma miejsce w przypadku zestawów kołowych z hamulcem tarczowym, korrugacja kół w strefie kontaktu ze wstawką hamulcową oraz pęknięcia termiczne o charakterze zmęczeniowym na powierzchni tocznej. Efektem tego zjawiska jest występowanie lokalnie twardego martenzytu na powierzchni tocznej.

W dalszym ciągu prowadzone są badania opisane w pracach, nad szczegółowym poznaniem przyczyn niektórych form zużycia jak korrugacji [5, 18, 25, 31], zmniejszeniem intensywności zużycia kół [51, 54, 70, 71] przez dobór materiałów na parę cierną koło-szyna lub nad nowymi profilami kół [41, 46, 62, 140].

1.5. Podsumowanie zużycia powierzchni tocznej kół kolejowych

Z przeprowadzonej analizy zjawisk tarcia i procesów zużycia w warstwie wierzchniej kół kolejowych w wyniku kontaktu z szyną lub dodatkowo z klockiem hamulcowym wynika, że złożoność procesów tarcia jakie występuje w wyniku toczenia kół po szynach powoduje trudności w zbudowaniu ogólnego modelu intensywności zużycia powierzchni tocznej uwzględniającego wszystkie czynniki towarzyszące procesowi tarcia. Pojawia się konieczność dalszych badań, aby takie modele było możliwe do uzyskania. W szczególności analizując zużycie kół kolejowych można stwierdzić, że:

- 1) Występujące hipotezy (mechaniczne, adhezyjne, adhezyjno-mechaniczne, molekularne, itp.) są najczęściej funkcją kilku zmiennych, które w danym przypadku uznawane są za dominujące. W tym celu najlepsze opisanie mechanizmu zużycia uzyskuje się dla konkretnych przypadków jak tylko toczenie po szynie lub zużycie obrzeża (jego podcięcie). W niektórych przypadkach można spotkać się z trudnością odwzorowania modelu zużycia z wynikami badań cierno-mechanicznymi przy bardzo dużych obciążeniach cieplnych wynikających z działania hamulca klockowego.
- 2) W przypadku stałych i niezmiennych warunków brzegowych związanych z eksploatacją zestawów kołowych, obserwuje się liniowe zużycie powierzchni tocznej kół. Na tej podstawie możliwe jest prognozowanie dalszego zużycia.
- 3) W sytuacji użytkowania pojazdów szynowych w różnych warunkach (ukształtowanie terenu, liczba łuków, prędkość, obciążenie itp.) procesy zużycia nie dają się opisać jedną matematyczną zależnością, które byłaby przydatna przy ocenie stanu kół kolejowych w wyniku kontaktu koła z szyną pojazdu szynowego.
- 4) W przypadku powierzchni tocznej kół można zaobserwować zarówno okresy o zużyciu liniowym jak i okresy o zużyciu nieliniowym, co ma miejsce przy zmiennych warunkach użytkowania pojazdów szynowych,
- 5) Ze względu na różny charakter i postać zużycia powierzchni kół kolejowych, uzasadnione jest podjęcie dalszych działań nad opracowanie rozszerzonej metodyki badań zjawisk kontaktowych koło-szyna i koło-wstawka hamulcowa. Doprowadzi to do poznania zjawisk wpływających na propagację procesu zużycia i opracowanie mechanizmów spowalniających ten proces.

2. PROCESY OBSŁUGOWO-NAPRAWCZE POJAZDÓW SZYNOWYCH

2.1. Stan wiedzy z zakresu eksploatacji obiektów kolejowych

Pojęcie eksploatacji przez wielu badaczy definiowane jest w różny sposób i przedstawione w pracach [68, 99, 117 i 141]. Niektórzy autorzy prac jak [49, 59] wyraźnie rozdzielają pojęcie eksploatacji na teorię i naukę, która jest pojęciem szerszym i zawiera w sobie zarówno teorię z wiedzą praktyczną o obiektach technicznych. W pracy [62] eksploatacja wyjaśniona jest nauką o optymalnym wykorzystaniu urządzeń technicznych przez człowieka. W wielu przypadkach badacze [69, 67] definiują eksploatację w ramach czasowych tj. od chwili wykonania pojazdu lub maszyny aż do jej likwidacji (utylicacji). Inni uważają [139], że eksploatacja to wszystkie czynności, zjawiska, zdarzenia i procesy jakie występują w obiekcie technicznym od chwili wytworzenia aż do jego likwidacji, również nazywanej złomowaniem. Autor pracy [94] eksploatację dzieli na użytkową czyli prawidłowego wykorzystania obiektu zgodnie z jego funkcją i eksploatację obsługową związaną z utrzymaniem pojazdu czy maszyny w stanie zdadności i przywracanie tego stanu podczas jego napraw. Była to pierwsza próba podziału eksploatacji na dwa pojęcia (użytkowanie i obsługa) ściśle powiązane ze sobą i taki podział utrzymał się do dnia obecnego. Termin eksploatacja również wyjaśniony został na przykładzie pracy [99] jako łańcuch działania ze wzajemnymi relacjami między podmiotem działania x , a pośrednikiem działania y i przedmiotem działania z , co zostało zapisane następującym równaniem:

$$L_e = \langle x, y, z \rangle \quad (2.1)$$

Równanie (2.1) należy wyjaśniać w ten sposób, że człowiek jako operator (użytkownik) za pośrednictwem urządzenia lub urządzeń techniczny działa na przedmiot tj. na pojazd w celu uzyskania zamierzonego efektu (np. jego ruch lub inne działanie robocze). Stąd zgodnie z pracą [132] wyróżnia się dla pojazdu będącego przedmiotem działania – łańcuch użytkowania i łańcuch obsługiwania. Natomiast w pracy [101] zapisano, że działanie to zespół złożony z łańcucha działania wykonującego określony cel razem z otoczeniem tego łańcucha działania. Natomiast system działania to zbiór układów działania o różnych właściwościach uporządkowany w pewną relację. Dlatego zgodnie z pracą [48] możliwe jest nazywanie wszystkich elementarnych układów systemem eksploatacji. Takie systemowe podejście już było przytaczane dla pojęcia eksploatacji w wielu pracach jak np. w [64, 67, 99].

System eksploatacji jako zbiór stanów S_e zgodnie z pracą [46] definiowany jest przez stany użytkowe oraz obsługowe i zapisany w następujący sposób:

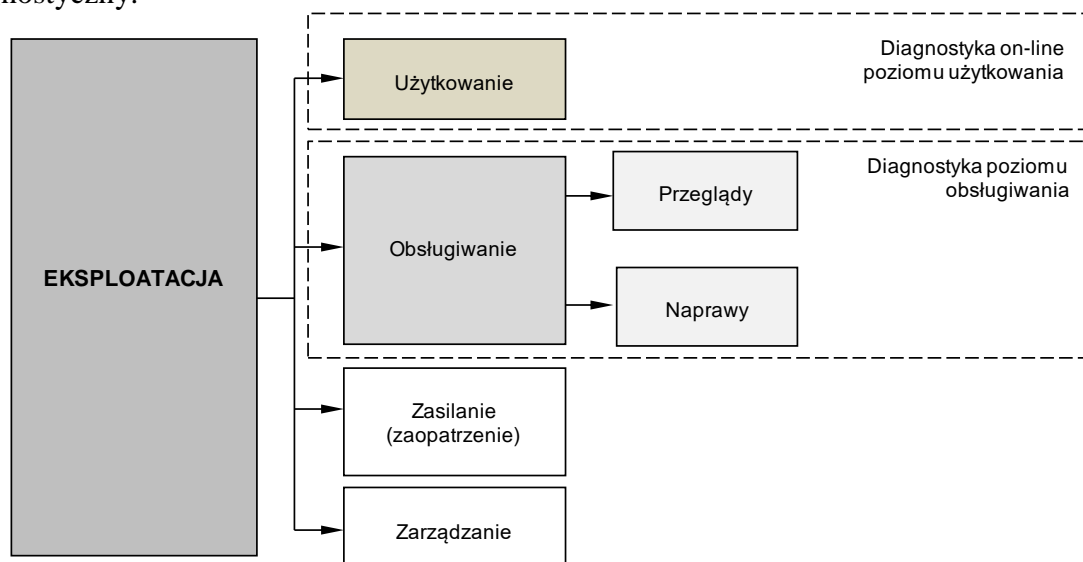
$$S_e = S_{u1}, \dots, S_{ua} \cup S_{o1}, \dots, S_{ob} \quad , \quad (2.2)$$

gdzie: S_{u1}, \dots, S_{ua} – zdefiniowane stany użytkowe,
 S_{o1}, \dots, S_{ob} – zdefiniowane stany obsługowe.

Na podstawie równania (2.2) stwierdza się, że w systemie eksploatacji pojazdu stany użytkowania uzależnione są od stanu technicznego pojazdu wykonanego zgodnie z jego dokumentacją. Natomiast stany obsługowe związane są konkretnymi zadaniami jakie należy wykonać aby utrzymać lub przywrócić wymagany stan techniczny do realizacji zadań przewozowych przez pojazdy szynowe.

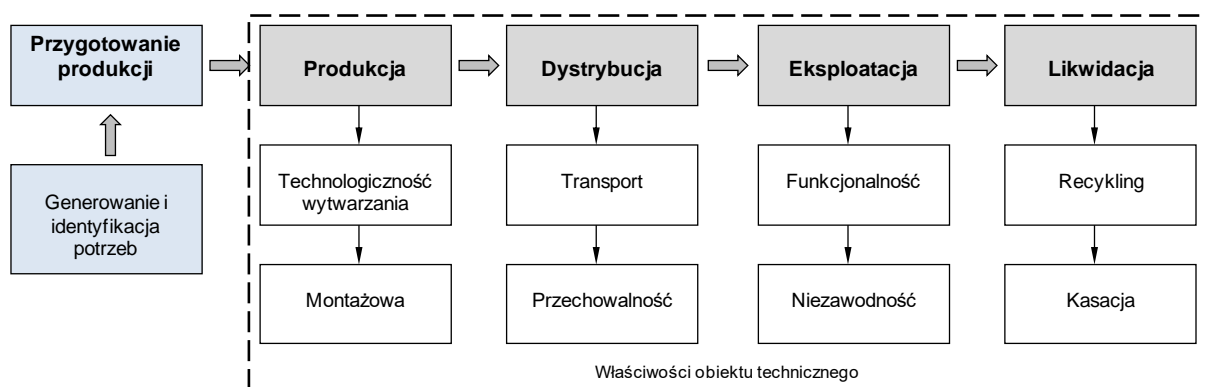
Czynności obsługowo-naprawcze jako składowe ogólnego systemu eksploatacji są niezbędne w celu utrzymania pojazdu szynowego w stanie ciągłej sprawności z zachowaniem wymaganego poziomu bezpieczeństwa [55]. Większe wymagania stawia się obiektom technicznym w tym układom biegowym pojazdu pod względem trwałości i niezawodności.

Zaawansowanie techniczne pojazdów szynowych w zakresie mechatronicznym doprowadziło do sytuacji, w której część układów podlega ciągłej diagnostyce on-line w celu identyfikacji stanów awaryjnych. Przykładem takich układów jest układ napędowy, hamulcowy, sterowania czy zasilania pojazdu w energię elektryczną. Na rysunki 2.1 przedstawiono graficznie proces eksploatacji zgodnie z pracą S. Legutko [49] rozbudowany o proces diagnostyczny.



Rys. 2.1. Podział działań podlegających procesowi eksploatacji [49]

Eksploatacja jest jedną z faz cyklu życia systemu technicznego. Na początku zgodnie z J. Koniecznym podawano tylko trzy fazy istnienia obiektu technicznego jak projektowanie, wytwarzanie i eksploatację. Następnie S. Niziński w pracy [67] wskazuje na cztery fazy obiektów technicznych jak potrzeba, projektowanie z konstruowaniem, wytwarzanie oraz eksploatację. Zgodnie z pracami B. Żółtowskiego [68, 141] cykl życia obiektu technicznego również składa się z czterech faz jak wartościowanie (rozpoznanie potrzeby), konstruowanie (dobór cech konstrukcyjnych), wytwarzanie (wykonanie zgodnie z dokumentacją) oraz eksploatacja czyli istnienie środka technicznego w rozumieniu funkcjonalnym realizującego postawione cele. Według L. Powierzy [74] projektowanie (I faza) i wytwarzanie (II faza) to inaczej konstytuowanie zasobu użytkowego, a wyczerpywanie zasobu użytkowego (III faza) z recyklingiem (IV faza) to już eksploatacja. W. Tarełko w pracy [122] zaproponował rozbudowany do pięciu faz cykl życia obiektu technicznego, co przedstawia rysunek 2.2. W stosunku do faz cyklu życia obiektu technicznego, W. Tarełko uwzględnił na końcu fazę likwidacji związanej z kasacją obiekt i recyklingiem.



Rys. 2.2. Piętofazowy cykl życia obiektu technicznego [68]

Należy zwrócić uwagę zgodnie z rysunkiem 2.2, że pierwsza faza związana z przygotowaniem produkcji poprzedzonej sformułowaniem głównych celów i założeń dla nowego produktu lub pojazdu wynika zarówno z doświadczeń zebranych z eksploatacji wcześniejszych i podobnych pojazdów oraz z chęci posiadania przewagi względem pojazdów innych producentów.

Głównym celem procesu eksploatacji pojazdów szynowych jest sprawdzenie właściwości pojazdu w aspekcie zgodności jego z warunkami dopuszczenia do ruchu, realizacji funkcji użytkowych (przewóz ludzi lub ładunków) oraz identyfikacja stanów niezdatności. Pierwszy cel jest nadrzędny i wynika ze spełniania obowiązujących aktów prawnych. Istnieje szereg przepisów określających procedurę dopuszczenia pojazdu do ruchu, dla przykładu w samym zakresie technicznym pojazd musi spełnić wszystkie punkty zgodnie z TSI (Techniczne specyfikacje interoperacyjności). Wymaga to przeprowadzenia wielu badań i symulacji komputerowych zapewniających spełnienie poszczególnych punktów TSI dla zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa [86]. Osobną kwestią w tym zakresie jest przeprowadzenie oceny bezpieczeństwa dla pojazdu lub jego zespołu (części) i oceny ryzyka zgodnie z rozporządzeniami [79, 80, 81], co również zostało przedstawione w pracach [28, 29]. Na tym etapie dokonuje się identyfikacji zagrożeń, następnie szacowanie jawnego ryzyka np. metodą FMEA i tworzeniem rejestru zagrożeń. Proces ten kończą dowody na spełnienie wymogów bezpieczeństwa, a wykazane ryzyka dla pojazdu utrzymane są na dopuszczalnym poziomie.

Drugi cel związany jest z użytkowaniem pojazdu w prognozowanym okresie, który odnoszony jest do czasu eksploatacji i przebiegu pojazdu wyrażonego w kilometrach. Dlatego proces obsługowo-naprawczy to szereg czynności wykonanych na pojeździe definiowanym jako złożony systemem eksploatacji, w którym wszystkie jego części i zespoły będą zdolne do pracy [63]. Trzeci cel eksploatacji pojazdu to monitorowanie zużycia poszczególnych elementów pojazdu, tworzenie dokumentacji z okresowo przeprowadzonymi pomiarami i badaniami oraz ocena czy poszczególne kryteria zużycia kresowego nie zostały przekroczone.

Pierwszym dokumentem związanym w pewnym stopniu z procesem obsługowo-naprawczym jeszcze przed fazą projektowania pojazdów szynowych jest dokument nazywany Specyfikacją Istotnych Warunków Zamówienia SIWZ. Jest to dokument, który występuje w postępowaniu o udzielenie zamówienia publicznego sporządzony przez instytucję zamawiającą np. przewoźnika kolejowego (właściciela pojazdu). Specyfikacja Istotnych Warunków Zamówienia w jednoznaczny sposób precyzuje potrzebę istnienia danego pojazdu o zdefiniowanych parametrach funkcjonalno-technicznych. Dlatego jest to składnik niematerialnej pierwszej fazy istnienia pojazdu (cyklu życia obiektu technicznego), czyli identyfikacji potrzeby [99]. W zakresie drugiej fazy cyklu życia obiektu (pojazdu szynowego) należy wymienić Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru WTWiO. Jest to dokument sporządzony dla nowej konstrukcji pojazdu zawierającego wymagania wykonawcze jak i technologiczne oraz wymagania prawne związane z dopuszczeniem pojazdu do ruchu (do użytkowania). Opisy czynności związanych z eksploatacją pojazdu szynowego (trzecia faza cyklu życia obiektu) zawarte są w Dokumentacji Techniczno-Ruchowej DTR. Jest to dokument, który zawiera niezbędne dane charakteryzujące pojazd i jego zespoły oraz instrukcje dotyczące użytkowania i obsługi pojazdu. Również w zakresie eksploatacji pojazdu szynowego zakres techniczny utrzymania zespołów np. zestawów kołowych przedstawiony jest w Dokumentacji Systemu Utrzymania DSU. Dla użytkownika pojazdu oraz zakładu zajmującego się jego utrzymaniem i naprawą jest to najważniejszy dokument. W dokumentacji DSU zawarte są szczegółowe informacje z zakresu oceny stanu technicznego, przeprowadzonych pomiarów, weryfikacji otrzymanych wyników z wymaganiami oraz zakwalifikowania pojazdu do dalszego użytkowania lub naprawy. W DSU dla osoby obsługującej pojazd podane są przykładowe protokoły (najczęściej tabele) do wpisywania pomiarów wielkości geometrycznych wraz z kryteriami do późniejszej oceny.

2.2. Specyfika działania i strategie eksploatacji kolejowych systemów technicznych

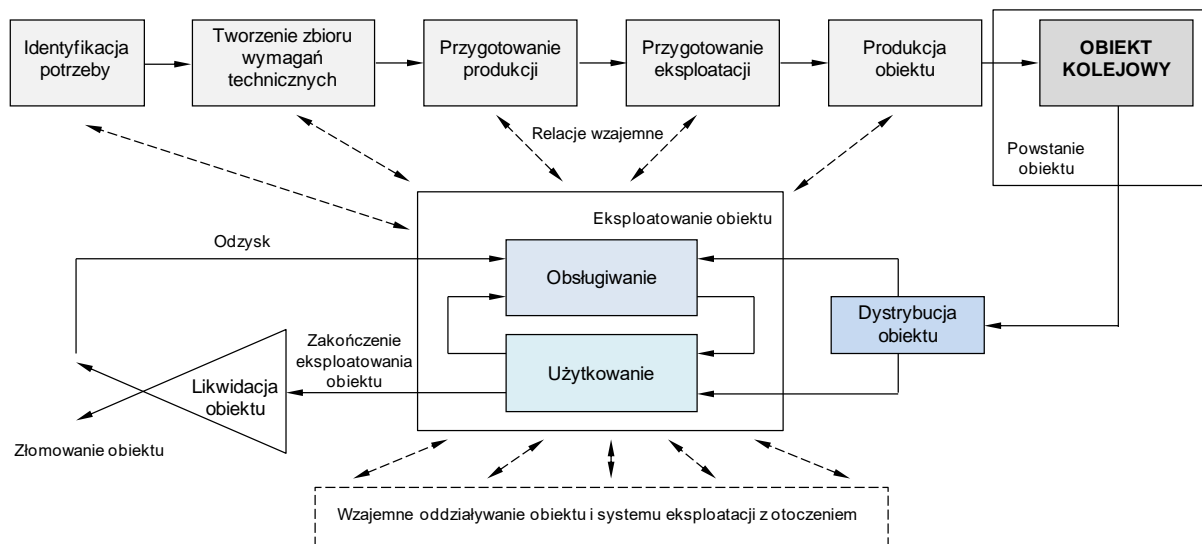
Tabor kolejowy, ze względu na swoją złożoność i występowanie w infrastrukturze kolejowej w otoczeniu urządzeń energetycznych, ma istotny wpływ na życie i bezpieczeństwo ludzi, zarówno znajdujących się w pojeździe jak i wokół niego (np. na przejazdach kolejowo-drogowych). Wspomniana złożoność taboru przekłada się na problemy techniczne w zakresie jego obsługi, które można podzielić na trzy grupy zgodnie z pracą [63].

W pierwszej kolejności należy wymienić złożoność konstrukcyjną i technologiczną pojazdów szynowych. Wynika to z różnych przebiegów zużycia zespołów i części, co ma miejsce podczas dynamicznego użytkowania (ruch planowy pociągów pasażerskich). W efekcie utrudnione jest podejmowanie decyzji o obsłudze ze względu na zróżnicowanie konstrukcyjne i technologiczne zespołów pojazdu [141].

Drugim ważnym czynnikiem wpływającym na problemy natury technicznej w procesie obsługi jest złożoność samego systemu eksploatacji, jego otoczenia w którym pracuje. System użytkowania pojazdu szynowego nastawiony jest na jak najdłuższe wykonywanie zadań przewozowych i czerpanie z nich korzyści finansowych. Natomiast system obsługi powoduje wyłączenie pojazdu z użytkowania i brak możliwości realizacji zadań. W przypadku przewoźników pasażerskich skierowanie pojazdu na obsługę powoduje wyłączenie dla tego pojazdu możliwości zakupu biletów (wyłączenie systemu biletowego), który obecnie funkcjonuje nie tylko w kasach na dworcach ale w ogólnodostępnym Internecie (w postaci aplikacji na telefonach), który cieszy się popularnością wśród pasażerów. Dlatego system użytkowania wymusza na systemie obsługi skrócenie czasu przeglądu i obsługi pojazdu wyłączonego z ruchu. Zgodnie z pracami [93] w celu wydłużenia czasu użytkowania pojazdu wydłuża się okresy kierowania pojazdu na przeglądy zgodnie z harmonogramem cykli przeglądowo-naprawczych. Jest to bardzo trudne i odpowiedzialne zadanie dla zespołu osób wydłużających okresy przebywania pojazdu w użytkowaniu i zmieniających zapisy w Dokumentacji Systemu Utrzymania. Wymaga to znajomości pełnej historii pojazdu z poprzednich okresów użytkowania i obsługi, przeprowadzenia dodatkowych badań niezawodnościowych i trwałości oraz symulacji komputerowych.

Trzecim powodem utrudnień natury technicznej w procesie obsługi jest podporządkowanie systemu eksploatacji systemowi hierarchicznie wyższemu [64]. Taka sytuacja ma miejsce gdy zapotrzebowanie rynku kolejowego wymusza zmiany w konstrukcji wagonów przeznaczonych do realizacji innych zadań przewozowych niż wynikało to z wcześniejszych założeń. Wymusza to na konstruktorach wagonów uwzględnienie takich założeń w budowie wagonów aby było możliwe stworzenie elastycznego, niezawodnego i efektywnego systemu obsługi [63]. Przykładem takiej sytuacji może być obecny trend przy modernizacji wagonów pasażerskich jako bezprzedziałowe bazując na klasycznych wagonach przedziałowych dla ogólnej wygody podróżnych i zwiększenia liczby miejsc w wagonie. Autor pracy [64] zwraca uwagę, że tego typu działania prowadzone są dla zwiększenia niezawodności systemu użytkowania, a w konsekwencji całego systemu eksploatacji, obniżenia kosztów eksploatacji, zwiększenia bezpieczeństwa i lepszego zaspokajanie potrzeb użytkowników pojazdów szynowych.

Złożoność systemu eksploatacji w pojazdach szynowych przekłada się na rozwiązywanie problemów eksploatacyjnych. Wynika to z różnych i złożonych relacji między eksploatacją a otoczeniem. Potrzeby rynku przewozowego determinuje „kształt” systemu eksploatacji i obiektów kolejowych [63]. Na rysunku 2.3 przedstawiono schematycznie proces realizacji i eksploatacji obiektów kolejowych.



Rys. 2.3. Proces realizacji i eksploatacji obiektów technicznych na przykładzie pojazdów kolejowych [63]

Analizując rysunek 2.3 stwierdza się, że obiekty kolejowe od chwili czasowej ich powstania poprzedzonej procesem identyfikacji potrzeb i tworzenia wymagań technicznych, aż do likwidacji, funkcjonują w złożonym i dynamicznym systemie eksploatacji. Na ten system w rozumieniu niezawodności i trwałości bezpośrednio i najmocniej działa system użytkowania. Natomiast pośrednio również ma wpływ otoczenie. Dla pojazdów kolejowych wpływ otoczenia nie zawsze należy definiować jako warunki atmosferyczne, które przekładają się na stan techniczny pojazdu ale również takie systemy infrastruktury jak torowisko i sieć kolejową.

W celu wydłużenia cyklu życia obiektów technicznych przyjmuje się różne strategie eksploatacji. Zgodnie z [117] strategia eksploatacji pozwala na przyjęcie konkretnego i z góry założonego sposobu prowadzenia procesu użytkowania i obsługiwanego obiektu technicznego. Narzucenie pewnych kryteriów w strategii eksploatacji również pozwala na obserwację relacji jakie występują między tymi procesami do dalszych analiz. W literaturze [47, 59, 141] w zakresie obiektów technicznych najczęściej wymienia się strategie eksploatacji w oparciu o niezawodność obiektów, efektywność ekonomiczną, wg ilości wykonanej pracy, w oparciu o stan techniczny obiektu i autoryzowaną strategię eksploatacji maszyn. Wymienione strategie eksploatacji w odniesieniu do różnych obiektów technicznych pozwalają na budowę systemu eksploatacji zgodnie z pracą [68].

Strategia oparta na niezawodności dotyczy oceny stanu technicznego obiektu bazując na wynikach z okresowej kontroli poziomu niezawodności pracującego obiektu jakim jest np. pojazd szynowy. Dokonuje się tego bazując na miarach niezawodności jak średni czas między uszkodzeniami czy średni czas naprawy oraz na podstawie wskaźników niezawodności jak np. dostępność czy efektywność. Wspomniane poziomu niezawodności prowadzi się dla maszyn czy pojazdów, aż do chwili wystąpienia uszkodzenia. Wykaz wykorzystywanych miar i wskaźników niezawodności przedstawiono w podrozdziale 2.3. Należy podkreślić, że w szerszej analizie, strategia oparta na niezawodności wykorzystuje metody statystyczne [59].

Strategia efektywności ekonomicznej bazuje na podstawie danych związanych z opłacalnością działania obiektu technicznego i generowanych korzyści finansowych. Mimo, że strategia w głównej mierze bazuje na wyliczeniach ekonomicznych, kosztach użytkowania, obsługi i okresowych napraw, to do analiz również wykorzystuje się wskaźniki niezawodności. Na podstawie tych wyliczeń podejmuje się decyzję o zakwalifikowaniu obiektu technicznego do dalszego procesu użytkowania lub do likwidacji połączonej z odzyskiem niektórych części lub zespołów. W przypadku pojazdów kolejowych zamiast likwidacji pojazdu przez jego złomowanie może być sprzedaż dla innego przewoźnika. Cechą

szczególną tej strategii jest ciągle zbieranie danych nie tylko związanych z oceną stopnia zużycia i spełnienia odpowiednich kryteriów z dalszym użytkowaniem ale również odnoszenie ich do mierników i wskaźników ekonomicznych i generowanego przez pojazd zysku dla właściciela lub przewoźnika [7, 139].

Strategia planowo-zapobiegawczych napraw PZN lub strategia w oparciu o ilość wykonywanej pracy, bazuje na takich parametrach oceny jak liczba godzin pracy np. maszyny, liczby przejechanych kilometrów przez pojazd lub ilości zużywanego paliwa lub innych materiałów eksploatacyjnych. Nadrzędnym celem tej strategii jest zapewnienie bezpieczeństwa użytkownikom i innym osobom i niezawodności w określonym okresie niezależnie od stanu technicznego. Dla zapewnienia tych wymagań pojazdy kierowane są na obsługę i naprawę zanim pojawią się pierwsze symptomy awarii. Dlatego zasadą w tej strategii jest wcześniejsze zapobieganie uszkodzeniom poprzez kierowanie pojazdu lub maszyny na obsługę po określonym z góry czasie użytkowania lub po przejechaniu liczby kilometrów przed osiągnięciem kresowego (granicznego) zużycia. Wspomniana strategia ma szczególne zastosowanie w lotnictwie, w pojazdach szynowych czy w górnictwie, gdzie bezpieczeństwo i niezawodność są priorytetowe. Z punktu ekonomicznego, taka strategia jest mało efektywna, gdyż zakłada, że wszystkie obiekty są eksploatowane ekstremalnie czyli w najtrudniejszych możliwych do wystąpienia warunkach i obciążeniach. Do głównych wad strategii PZN należy sztywny cykl przeglądowo-naprawczy, niska efektywność wykorzystania potencjału użytkowanej maszyny lub pojazdu ze względu na złożoność jego mechanizmów o różnych charakterystykach trwałości, konieczność angażowania znacznych środków na obsługę i naprawę oraz trudność w określeniu optymalnego czasu użytkowania, po którym obserwuje się wzrost kosztów eksploatacji pojazdu szynowego [59].

Strategia bazująca na stanie technicznym maszyn lub pojazdu oparta jest na zastosowaniu ciągłej diagnostyki technicznej. Założeniem tej strategii jest identyfikacja pierwszych symptomów diagnostycznych świadczących o zmianie stanu technicznego głównych zespołów i elementów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i trwałość w jak najdłuższym okresie użytkowania. W strategii według stanu technicznego obiekty techniczne, ze względu na swoją wartość wyposażone są w bardzo dużą liczbą czujników pomiarowych do zbierania danych o wielkościach fizycznych jak np. temperatura czy ciśnienie, wielkościach mechanicznych jak moment obrotowy czy naprężenia oraz wielkościach elektrycznych jak natężenie prądu czy napięcie. Wspomniane wielkości odnoszące się do wielu układów na pojeździe zapisywane są w funkcji czasu w rejestratorze, a w przypadku przekroczenia wartości granicznych przesyłane bezpośrednio do użytkownika pojazdu jak i do właściciela pojazdu. Ten rodzaj strategii ma już zastosowanie w pojazdach szynowych i nazywany jest strategią w oparciu o diagnostykę on-line. W pracach [8, 9] autorzy przedstawili przykład diagnostyki on-line stanu technicznego tramwajów oraz infrastruktury tramwajowej w Poznaniu w oparciu na pomiarach wibroakustycznych z przetworników drgań i hałasu znajdujących się w określonych miejscach na pojazdach. Zarządca infrastruktury jak i podmiot odpowiedzialny za utrzymanie tramwajów w Poznaniu za pośrednictwem łącza internetowego, ma możliwość na bieżąco obserwować pojazdy w ruchu łącznie z generowanymi sygnałami wibroakustycznymi.

Autoryzowana strategia jest drugą po strategii opartej na diagnostyce on-line najnowszą strategią w eksploatacji maszyn czy pojazdów. W tej strategii zgodnie z [63] zastosowana jest tzw. pętla jakości, w której producent maszyny lub pojazdu odpowiedzialny jest za swój wyrób od chwili opracowania koncepcji, poprzedzonej okresem badań marketingowych z badaniem rynku, przez konstrukcję, produkcję, eksploatację aż do likwidacji z utylizacją. Rozszerzając znaczenie wymienionej eksploatacji, producent również jest odpowiedzialny za serwis pojazdu wraz z diagnostyką techniczną. Autoryzowana strategii przez innych badaczy jak [141] jest efektem połączenia wiedzy z zakresu teorii eksploatacji ze zdefiniowanymi

cyklami życia pojazdu lub maszyny z diagnostyką techniczną. Na rysunku 2.4 przedstawiono graficznie kolejność działań w autoryzowanej strategii eksploatacji.



Rys. 2.4. Założenia autoryzowanej strategii eksploatacji maszyn i pojazdów [68,117]

Producent maszyny lub pojazdu w większości przypadków narzuca i podaje strategię eksploatacji użytkownikowi. Jest to podawane w stosownych dokumentacjach jak w przypadku pojazdów szynowych – w dokumentacji systemu utrzymania. Ten przypadek jest słuszny we wszystkich wymienionych strategiach, które wskaże producent. Natomiast w przypadku pojazdów nie objętych gwarancją producenta, użytkownik pojazdu lub właściciel pojazdu posiada większą swobodę działania i może po pierwsze sam proponować zmiany w systemie utrzymania przestrzegając stosownych procedur dla zamiany dostawcy np. kół kolejowych czy tarcz hamulcowych oraz po drugie zmiany wydłużenia okresów użytkowania pojazdu w odniesieniu do czasu i przebiegu. Takie działanie jest możliwe na podstawie długoletniej obserwacji pojazdu i zebranych danych z jego eksploatacji. Tym samym opracowany jest autorski model obsługowy, który u konkretnego użytkownika (właściciela) na jego obszarze użytkowania sprawdza się. Warto podkreślić, że ten sam typ pojazdu zakupiony przez innego właściciela w innej części kraju, ze względu na warunki eksploatacji jak teren górzysty z częstymi opadami śniegu sprawi, że autorski model obsługi wypracowany u użytkownika pojazdu z terenu nizinnego nie będzie mógł być zastosowany.

2.3. Miary i wskaźniki oceny efektywności systemu eksploatacji

Zastosowanie miar, a w konsekwencji wskaźników efektywności eksploatacji jest niezbędne w ocenie złożonych obiektów technicznych jak pojazdy szynowe. Przyszłe działanie pojazdu uzależnione jest od wyboru właściwych wskaźników efektywności systemu eksploatacji, niektóre z nich będą miały charakter liczbowy, wymiarowy, z określoną jednostką, a inne liczbowy bezwymiarowy. Zgodnie z pracą [26] mogą być również zastosowane miary cząstkowe stałe i miary zmienne. W przypadku miar cząstkowych stałych uwzględnia się tylko nakłady poniesione na budowę maszyny lub pojazdu bez uzależnienia ich od dalszego przebiegu procesu eksploatacji. W drugim przypadku miar zmiennych, uzależnia się je od zmieniających się nakładów na eksploatację pojazdu i pośrednio dotyczą prawdopodobieństwa występujących zdarzeń, które mają miejsce w czasie użytkowania złożonego obiektu technicznego.

Ocenę efektywności systemu eksploatacji prowadzi się w oparciu o znane modele oceny, których wybór uzależniony jest od cech obiektu technicznego oraz jego wpływu na otoczenie

społeczno-organizacyjne. Na podstawie prac [56, 57] wybór miar efektywności powinien być uzależniony od stanu technicznego pojazdu, który jest miarą eksploatacji w określonym czasie, niezawodności jako gotowości do użytkowania, jakości jako zdolności do zaspokajania potrzeb, funkcjonalności jako miary relacji urządzenia (pojazdu) z człowiekiem, obsługiwalności jako miary możliwości przeprowadzenia wszelkich czynności obsługowych i diagnozowalności jako możliwości bezinwazyjnej oceny stanu części i zespołów pojazdu.

W pracy [61] ocenę efektywności eksploatacji maszyn czy pojazdów z powodzeniem prowadzi się w oparciu o wykorzystanie trzech wskaźników syntetycznych jak wskaźnik wykorzystania maszyny (pojazdu), wskaźnik wydajności i wskaźnik rentowności.

Loska w pracy [57] wśród współczesnych modeli oceny efektywności eksploatacyjnej do oceny ilościowej proponuje trzy modele tj. model niezawodnościowy, efektywności eksploatacyjnej w literaturze zagranicznej nazywany *Overall Equipment Effectiveness* oraz model organizacyjno-techniczny (*Key Performance Indicators*). Zestawienie obecnie stosowanych miar w ocenie efektywności eksploatacji przedstawiono w tabeli 2.1.

Tab. 2.1. Miary efektywności eksploatacji obiektów technicznych [117, 139]

Lp.	Symbol	Nazwa j. polski	Nazwa j. angielski
1	MTTF	średni czas do wystąpienia niezdatności	<i>Mean Time to Failure</i>
2	MTTR	średni czas odnowy systemu technicznego	<i>Mean Time to Repair</i>
3	MTBF	średni czas między uszkodzeniami	<i>Mean Time Between Failure</i>
4	MDT	średni czas przestoju	<i>Mean Down Time</i>
5	MTR	średni czas trwania naprawy	<i>Mean Time Repair</i>
6	MFOT	średni czasu działań związanych z naprawami	<i>Mean Fault Occurrence Time</i>
7	OEE	całkowita efektywność sprzętu (wyposażenia)	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>

Wymienione w tabeli 2.1 miary mogą w niektórych przypadkach stanowić wskaźniki efektywności systemu eksploatacji lub stanowić miary do wyznaczenia innych wskaźników.

Miara MMTF wskazuje średni czas pracy urządzenia lub pojazdu od rozpoczęcia eksploatacji (lub od czasu ostatniej naprawy) do chwili czasowej wystąpienia kolejnej niezdatności [81]. Wskaźnik MTTF nie określa i nie podaje czasu naprawy czy konserwacji.

Miara MMTR jest najczęściej stosowaną miarą efektywności utrzymania ruchu i określa średni czas, który jest niezbędny do wykonania niezbędnych działań naprawczych. Tym samym określa czas naprawy i konserwacji obiektu technicznego [73].

Miara MTBF jest najczęściej stosowana w pomiarach niezawodności oceny efektywności eksploatacyjnej. Przedstawia średnią arytmetyczną czasów między uszkodzeniami systemu. Miara zakłada, że system jest gotowy do pracy bezpośrednio po usunięciu uszkodzenia i przekazaniu użytkownikowi pojazdu lub urządzenia technicznego [73, 119]. Miarę MTBF wyznacza się z zależności (2.3):

$$MTBF = MTF + MTR \quad (2.3)$$

Wskaźnik *MTBF* umożliwia w szerszym sensie prowadzenie analiz statystycznych, gdyż na jego podstawie możliwe jest określenie liczby uszkodzeń. Dlatego w wielu zakładach produkcyjnych na jego podstawie opracowuje się harmonogramy przeglądów profilaktycznych [118].

Zgodnie z normą PN-EN 15341:2007, wskaźniki efektywności eksploatacyjnej podzielone zostały na trzy grupy jako wskaźniki techniczne, ekonomiczne i organizacyjne dla trzech poziomów. Na rysunku 2.5 przedstawiono zestawienie wskaźników efektywności eksploatacyjnej obiektów technicznych.

WSKAŹNIKI EFEKTYWNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ		
TECHNICZNE	EKONOMICZNE	ORGANIZACYJNE
1. Czasu usunięcia uszkodzenia	1. Koszt działań odnoszony do ilości świadczonej produkcji	1. Udziału pracowników utrzymania ruchu w ilości sumarycznej pracowników
2. Czasu działań korekcyjnych	2. Koszt działań i braku świadczonej usługi odnoszony do ilości świadczonej produkcji	2. Udziału ilości pracowników pośrednich w sumarycznej ilości pracowników utrzymania ruchu
3. Czasu działań prewencyjnych	3. Koszt personelu odnoszony do sumarycznych kosztów eksploatacji	3. Wykorzystania potencjału w procesie planowania
4. Czasu działań diagnostycznych	4. Koszt zużycia zasobów materiałowych	4. Ilości czynności przy których występują wypadki
5. Średni czas między uszkodzeniami (MTBF)	5. Koszt zużycia narzędzi i sprzętu specjalistycznego	5. Ilości czynności przy których występuje zagrożenie potencjalne wypadkiem
6. Średni czas odnowy systemu technicznego (MTTR)	6. Udziału kosztów czynności korekcyjnych w sumarycznych kosztach eksploatacji	6. Ilości czynności przy których występuje zagrożenie dla środowiska
7. Średni czasu działań związanych z naprawami (MFOT)	7. Udziału kosztów czynności prewencyjnych w sumarycznych kosztach eksploatacji	7. Ilości czynności przy których występuje potencjalne zagrożenie dla środowiska
8. Dostępności obiektów eksploatacji	8. Udziału kosztów czynności diagnostycznych w sumarycznych kosztach eksploatacji	8. Wykorzystania potencjału na działania prewencyjne
9. Efektywności działań eksploatacyjnych	9. Udziału kosztów awarii w sumarycznych kosztach eksploatacji	9. Wykorzystania potencjału na działania korekcyjne
10. Efektywności planowania działań obsługowo-naprawczych		10. Wykorzystania potencjału na działania diagnostyczne
		11. Wykorzystania potencjału na działania związane z awariami
		12. Nadgodzin pracowników utrzymania

Rys. 2.5. Wskaźniki efektywności eksploatacyjnej [72, 117]

Analizując zestawienie współczynników na rysunku 2.5 zgodnie normą PN-EN 15341:2007, stwierdza się, że w zakresie organizacyjnym jest ich najwięcej względem grupy technicznej i finansowej. Większość ze wskaźników organizacyjnych jest bezwymiarowa (9 wskaźników bez jednostki) a tylko 3 jako wymiarowa w jednostce liczby pracowników i liczby nadgodzin. W przypadku wskaźników z grupy ekonomicznej, 5 określa różnego rodzaju koszty w ujęciu pieniężnym, a 4 jako np. udział procentowy w stosunku do innych kosztów. W przypadku wskaźników technicznych 7 wskaźników posiada jednostkę czasu a tylko 3 wskaźniki występują jako bezwymiarowe.

Najbardziej rozpowszechnionym wskaźnikiem z grupy modeli niezawodnościowych oceny efektywności eksploatacyjnej [139] jest wskaźnik dostępności technicznej. Występuje on jako dostępność techniczna A_t i dostępność operacyjna A_o zgodnie z zależnościami [2]:

$$A_t = \frac{T_{OT}}{T_{OT} + T_{DT.M}} = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (2.4)$$

$$A_o = \frac{T_{UT.t}}{t}, \quad (2.5)$$

gdzie: T_{OT} – całkowity czas pracy,
 $T_{DT.M}$ – sumaryczny czas działań utrzymaniowych,
 $T_{UT.t}$ – czas zdadności w czasie t .

Wskaźnik dostępności technicznej jest bardzo pomocny w pracy planistów i wydziałów organizujących proces produkcji ze względu na bazowanie na wartościach całkowitego czasu przestoju maszyny lub pojazdu [139], co jest tylko informacją ogólną. Jednak wskaźnik jest

niewystarczający w przypadku analiz efektywności pracy działów zajmujących się utrzymaniem.

Inny istotny wskaźnik jak efektywność E odnosi się do szybkości reakcji działu utrzymania np. na produkcji lub serwisu dla pojazdu w przypadku wystąpienia uszkodzenia w czasie użytkowania [7]. Wskaźnik efektywności wyraża się za pomocą miar niezawodności co przedstawia równanie (2.6).

$$E_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTR} \quad (2.6)$$

Wskaźnik efektywności może służyć w ocenie i analizie pracy służb utrzymania ruchu lub działów serwisowych w zakresie ich przygotowania organizacyjnego na wypadek losowych uszkodzeń.

Wskaźnik skuteczności S odnosi się do pracy pracowników utrzymania ruchu lub serwisu w usuwaniu powstałych uszkodzeń. Wskaźnik S podobnie jak wskaźnik E wyrażony jest za pomocą miar niezawodności, co przedstawia zależność (2.7).

$$S_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTR} \quad (2.7)$$

Wskaźnik skuteczności opisany zależnością (2.7) jest bardzo ważnym wskaźnikiem również przy analizie osób pracujących w utrzymaniu ruchu w szczególności w zakresie ich umiejętności i kompetencji.

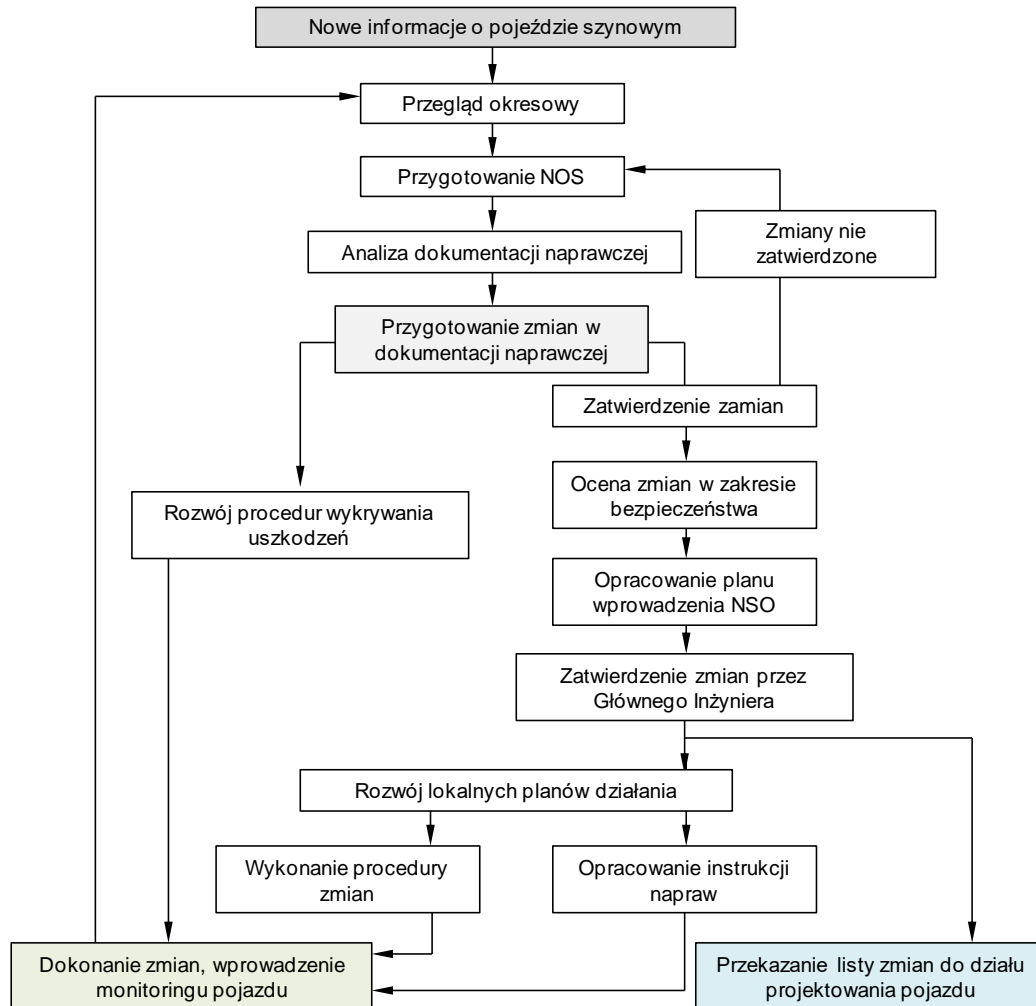
2.4. Nowoczesne metody zarządzania w eksploatacji pojazdów szynowych

Pojazdy szynowe ze względu na swoją złożoność, oddziaływanie na osoby znajdujące się w jego otoczeniu oraz w środku (pasażerowie), co związane jest z zachowaniem bezpieczeństwa, bezwzględnie podlegają zaostrzonym przepisom w zakresie użytkowania, obsługi i późniejszej naprawy. Z punktu przewozów istotne jest jak najdłuższe wykorzystanie pojazdu bez zbędnych przerw zgodnie z jego przeznaczeniem wyrażone w takich jednostkach jak tonokilometry czy pasażerokilometry i czerpanie z tego tytułu korzyści finansowych. Z drugiej strony nie jest możliwe użytkowanie w długim okresie czasu bez przerw na ocenę jego stanu technicznego gdyż wystąpienie poważnego uszkodzenia może spowodować długie i kosztowne wyłączenie pojazdu z użytkowania i skierowanie go na naprawę.

Klasyką w zarządzaniu eksploatacyjnym pojazdów są trzy strategie. Pierwsza to użytkowanie pojazdu do pierwszego uszkodzenia UPU, nie praktykowana w przypadku pojazdów szynowych. Druga strategia dotyczy planowo-zapobiegawczych napraw (system PZN) gdzie po wykonaniu przez pojazd odpowiedniej liczby kilometrów lub po upływie określonego czasu pojazd kierowany jest na naprawę. Jest to obecnie stosowane w pojazdach szynowych czy lotniczych ze względu na zapewnienie wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Trzecia strategia, jako pośrednia względem UPU i PZN to strategia użytkowania do planowanego przeglądu PP. Po określonym czasie i lub przebiegu pojazd kierowany jest na przegląd i w zależności od wyników pomiarów zużycia, pojazd kierowany jest na naprawę profilaktyczną lub wraca do użytkowania.

Na podstawie badań [59] stwierdzono, że wiek obiektów technicznych nie jest jedynym wyznacznikiem zawodności zważywszy, że maszyny i pojazdy są coraz bardziej złożone konstrukcyjnie. Przemysł lotniczy jako pierwszy zaproponował niezawodnościową strategię obsługiwaną NOS, która zgodnie z pracami zagranicznymi [78, 126] nazywana już była jako RCE (*Reliability Centred Maintenance*). Możliwe jest zgodnie z pracą [59] zastosowanie strategii NOS w pojazdach szynowych, jednak wymaga to znajomości przeznaczenia pojazdu szynowego (funkcji użytkowych), wiedzy z zakresu awaryjności jego zespołów i podzespołów, wiedzy odnośnie przyczyn występowania wspomnianych uszkodzeń i

pierwszych symptomów każdego uszkodzenia. Strategia niezawodnościowa NOS wymaga od pracowników działu utrzymania pełnej wiedzy o pojeździe i historii jego uszkodzeń z jednoczesną weryfikacją posiadanej wiedzy z osobami odpowiedzialnymi za użytkowanie pojazdu. Przykładowy proces ramowy przeglądów zgodnie ze strategią NOS przedstawia rysunek 2.6.



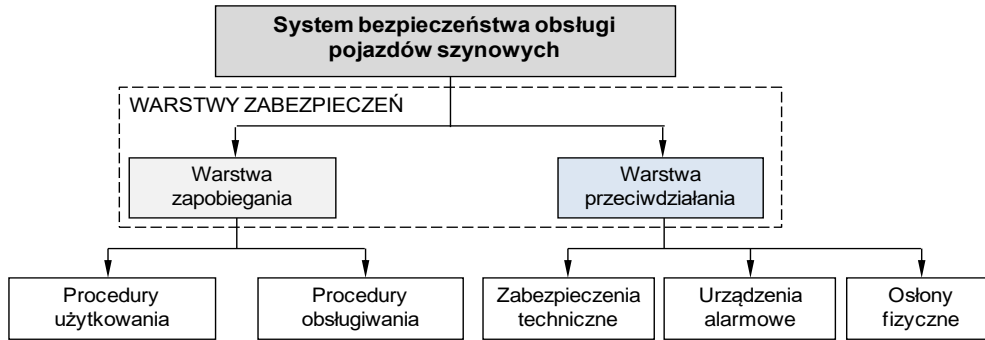
Rys. 2.6. Ramowy proces przeglądów na podstawie strategii NOS dla pojazdów szynowych [59]

Analizując proces przeglądów oparty na strategii NOS (rys. 2.6) stwierdza się, że zebrane informacje jako baza wiedzy o obiekcie pozwala na przygotowanie propozycji zmian do dokumentacji systemu utrzymania DSU poprzedzonej analizą z zakresu bezpieczeństwa. Główną przeszkodą przy wdrożeniu i stosowaniu strategii przeglądów wg NOS jest bardzo długi okres przeprowadzenia analizy uszkodzeń zespołów pojazdu szynowego i przezwyciężenie starych nawyków wśród osób zarządzających utrzymaniem pojazdów [59].

W ramach rozwoju strategii planowo-zapobiegawczych obsługa i napraw, ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa ludzi prowadzi się prace nad nowymi metodami wykorzystującymi w pojazdach szynowych miary ryzyka. W literaturze zagranicznej [47, 55] są to metody obsługi nazywane *Risk Based Maintenance* RBM. Za pośrednictwem miar ryzyka możliwe jest określenie wpływu stanu technicznego pojazdu szynowego na bezpieczeństwo osób znajdujących się w pojeździe jak i wokół niego. W celu zmniejszenia ryzyka z występowaniem uszkodzeń w pojazdach mechanicznych stosuje się najczęściej zabezpieczenia techniczne w postaci czujników zainstalowanych w węzłach kinematycznych podatnych na przyspieszone zużycie i awarie, urządzeń sygnalizacyjnych i alarmowych lub

dotychczasowych osłon. Drugim sposobem ograniczenia uszkodzeń na pojeździe są procedury organizacyjne wdrożone zarówno na etapie użytkowania i obsługi pojazdu.

W systemie obsługi pojazdów szynowych wykorzystującego procedury analizy i oceny ryzyka związanego z uszkodzeniami jego elementów i zespołów zastosowany jest system okresowych usług profilaktycznych. Stąd system bezpieczeństwa obsługi pojazdów szynowych OPS składa się z dwóch warstw, co przedstawia rysunek 2.7.



Rys. 2.7. Warstwy w systemie bezpieczeństwa obsługi pojazdów szynowych [28]

Analizując schemat podziału warstwowego systemu bezpieczeństwa obsługi pojazdów szynowych najważniejszą warstwą jest warstwa zapobiegawcza bazująca na organizacyjnym podejściu do kwestii procedur związanych z użytkowaniem i obsługą pojazdów szynowych.

W algorytmie analizy warstw zabezpieczeń kolejnym krokiem jest opracowanie scenariuszy powstawania zdarzeń niepożądanych przy wykorzystaniu najczęściej zgodne z pracą [29] Analizy Drzewa Zdarzeń ETA (*Event Tree Analysis*). Procedura metody Analizy Drzewa Zdarzeń składa się z takich etapów jak wykazanie występowania zdarzeń inicjujących lub zdarzeń szczytowych, identyfikacji oraz opisu systemów bezpieczeństwa i oddziaływania warunków zewnętrznych, konstrukcji drzewa zdarzeń, określenia sekwencji zdarzeń powodujących zdarzenia niepożądane lub inne zagrożenia oraz ilościowej analizy drzewa zdarzeń. Ostatnim etapem metody ETA jest dokumentacja zdarzeń powodujących zagrożenia.

System bezpieczeństwa obsługi pojazdów szynowych powinien zapewnić akceptowalny poziom ryzyka uszkodzeń jego złożonych z n -ej liczby elementów danego zespołu zgodnie z zależnością (2.8) [28]:

$$\forall_{i=1,2,\dots,n} = r_i \leq r^A, \quad (2.8)$$

gdzie: r_i – ryzyko związane z uszkodzeniem i -tego elementu zespołu pojazdu szynowego,
 r^A – akceptowana wartość ryzyka uszkodzenia zespołu pojazdu szynowego.

Natomiast straty wywołane uszkodzeniem elementu lub całego zespołu w ramach obsługi pojazdu szynowego można określić poprzez wyznaczenie prawdopodobieństwa korzystając z metody drzewa zdarzeń, co przedstawia równanie (2.9) [29]:

$$P_{S_{ijk}} = f_{ij}^{ZI} \cdot \prod_w P_{ijk}^{NWZ,w} \cdot \prod_v P_{ijk}^{ZW,v}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (2.8)$$

gdzie: S_{ijk} – straty występujące w k -tym scenariuszu zdarzeń związana z j -tego rodzaju uszkodzeniem i -tego elementu zespołu pojazdu szynowego,
 $P(S_{ijk})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia straty S_{ijk} ,
 f_{ij}^{ZI} – częstość występowania zdarzenia inicjującego, tj. j -tego rodzaju uszkodzenia i -tego elementu zespołu pojazdu szynowego,
 $P_{ijk}^{NWZ,w}$ – prawdopodobieństwo niezadziałania w -tej niezależnej warstwy zabezpieczeń zespołu pojazdu szynowego w k -tym scenariuszu rozwoju j -tego rodzaju uszkodzenia i -tego elementu tego zespołu,

$p_{ijk}^{ZW,v}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia v -tego rodzaju zdarzeń warunkujących w k -tym scenariuszu rozwoju j -tego rodzaju uszkodzenia i -tego elementu zespołu pojazdu szynowego.

Zastosowanie systemu bezpieczeństwa obsługi pojazdów szynowych można zaobserwować podczas próby optymalizacji czasu pracy między obsługami okresowymi pojazdów, co zostało przedstawione w pracy [27, 68, 125]. Liczbę jednostek pracy należy tak dobrać aby ryzyko związane z jego uszkodzeniem nie przekroczyło wartości dopuszczalnej.

2.5. Podsumowanie stanu wiedzy w zakresie procesów obsługowo-naprawczych stosowanych w eksploatacji pojazdów szynowych

Analizując wiedzę z zakresu szeroko rozumianych procesów obsługowo-naprawczych w pojazdach szynowych można stwierdzić, że jest to zagadnienie bardzo złożone i ciągle rozwijane. Na obecnym stanie wiedzy możliwa jest osobna i wydzielona analiza i ocena dla zagadnień związanych z użytkowaniem, procesów obsługowych i osobno dla procesów naprawczych. Dążenie do wydłużenia cyklu życia obiektów jakimi są pojazdy szynowy sprawia, że wszystkie wymienione procesy muszą być ściśle związane ze sobą i jednocześnie uzależnione od siebie w mniejszym lub większym związku. W szczególności można stwierdzić, że:

- 1) Strategia planowo-zapobiegawczych napraw jest strategią zapewniającą najwyższy poziom bezpieczeństwa jednak najdroższą w zastosowaniu. Z tego względu podjęte zostały dalsze prace nad nowoczesnymi metodami obsług i napraw jak strategia *NOS* czy *RBM*.
- 2) Nowoczesne strategie w eksploatacji pojazdów oparte są z jednej strony na pełnej historii pojazdu z zakresu awaryjności jego zespołów i ciągłej modyfikacji dokumentacji związanej z jego utrzymaniem oraz wytycznych do przyszłego projektowania pojazdu. Z drugiej strony związane są z oceną bezpieczeństwa i szacowaniem ryzyka tworząc rejestr zagrożeń dla danego pojazdu tak aby system bezpieczeństwa obsługi pojazdu zapewnił akceptowalny poziom ryzyka uszkodzeń jego zespołów. Są to jednak strategie wymuszające znaczne zaangażowanie personelu związanego z użytkowaniem pojazdów, obsługą oraz osób zarządzającymi tymi pracami w celu zebrania jak największej ilości informacji o historii pojazdu.
- 3) Najbardziej popularną i rozwijaną obecnie strategią występującą u przewoźników kolejowych jest strategia bazująca na stanie technicznym pojazdu, która oparta jest na zastosowaniu ciągłej diagnostyki technicznej. Bardzo często ze względu na łatwość dostępu do sieci Internet jest już zastosowanie diagnostyki on-line do ciągłej rejestracji różnych parametrów (wielkości fizycznych) związanych z ruchem pojazdu i towarzyszących mu procesów. Założeniem tej strategii jest identyfikacja pierwszych symptomów diagnostycznych świadczących o zmianie stanu technicznego głównych zespołów i elementów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i trwałość i kierowanie na obsługę jeszcze przed naprawą.
- 4) Obecnie rozwijane strategie związane z obsługą pojazdów szynowych to dynamiczne systemy eksploatacji poprzedzone analizami niezawodnościowymi z historii pojazdu oraz analizami z zakresu bezpieczeństwa i szacowania ryzyka, których celem z jednej strony jest wydłużenie cyklu życia obiektu jakim jest pojazd szynowy ale z drugiej strony optymalizacja w zakresie pracochłonności. W tym znaczeniu rozumie się np. wydłużanie czasu użytkowania między poszczególnymi obsługami okresowymi i późniejsze kierowanie pojazdu na obsługę, na przegląd itp. bez ryzyka wystąpienia uszkodzenia tj. zdarzenia niepożądanego.

3. BADANIA ROZPOZNAWCZE ZUŻYCIA KÓŁ POJAZDU EN97

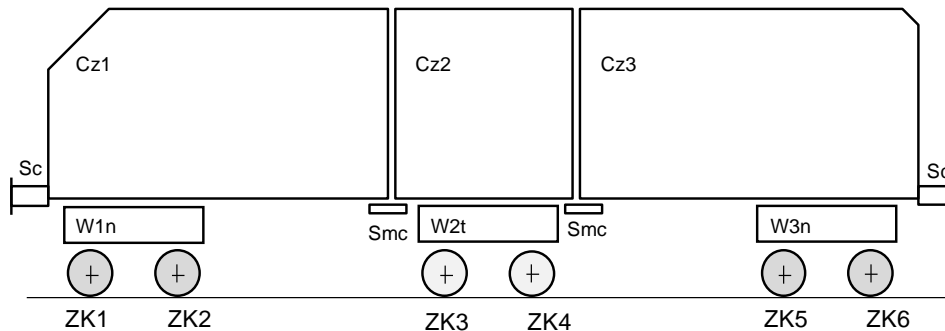
3.1. Geneza badań rozpoznawczych

Analizując zakres prac wykonywanych podczas eksploatacji wózków elektrycznych czy spalinowych zespołów trakcyjnych stwierdza się, że najczęstsze uszkodzenia występują w układzie biegowym, tj. w zestawach kołowych. Z tego względu najwięcej czasu przeznaczane jest na wykonanie niezbędnych pomiarów geometrycznych zestawu kołowego, wypełnienie stosownych kart pomiarowych zgodnie ze wzorem znajdującym się w dokumentacjach systemu utrzymania DSU danego pojazdu, a w przypadku zużycia i przekroczenia jakiegokolwiek parametru zestawu kołowego – skierowanie go do naprawy przez przetoczenie lub wymiany na nowy. Inne zespoły znajdujące się na wózku jak silniki trakcyjne, przekładnie mechaniczne, układy sprężynowania czy prowadzenia zestawu kołowego cechują się mniejszą intensywnością zużycia zgodnie z pracami [70, 71], niż toczący się po szynie zestaw kołowy. Zgodnie z przytoczoną funkcją niezawodności $R(t)$ w funkcji czasu eksploatacji, w pracach P. Piec stwierdził, że w każdym okresie możliwe jest uszeregowanie niezawodności elementów (zespołów) wózka tocznego w następującej kolejności: rama, czopy skrętowe, układ usprężynowania i prowadzenia, układ hamulcowy i zestaw kołowy o największej zawadności. Stwierdzone przypadki nagłych uszkodzeń w układzie napędowym lub pęknięć np. w okolicy ram wózków czy innych elementów wózka miały charakter losowy i mogły wynikać z popełnionych błędów systemowych podczas projektowania i konstruowania wózków lub wynikały z zaniedbań podczas wykonywania przeglądów i napraw zespołów znajdujących się na wózkach tocznych lub napędnych. W zespołach trakcyjnych w zależności od prędkości konstrukcyjnej, liczby członów z wózkami napędnymi i tocznymi jak również obciążenia poszczególnych zestawów kołowych, proces zużycia powierzchni tocznej kół nie przebiega równomiernie na wszystkich zestawach kołowych. Wymienione wyżej czynniki wpływające na zużycie zestawów kołowych wynikają z cech konstrukcyjnych pojazdu. Druga grupa czynników przekładających się na intensywność zużycia powierzchni wieńca kół nie związanych z pojazdem to ukształtowanie terenu (obszary góryste lub nizinne), liczba łuków jak również warunki klimatyczne tj. jazda w okresie zimowym, jesiennym lub letnim. Okres jesienny to początek utrudnień związanych z prowadzeniem ruchu kolejowego, kiedy szyny zaczynają być mokre, często pokryte liśćmi, co przekłada się na utrudniony rozruch i hamowanie powodujące niezapewnienie ciągłości w styku koła z szyną. Takich sytuacjach, kiedy koło nie obracając się, przesuwa się po szynie, dochodzi do zjawiska punktowego wytarcia powierzchni koła nazywane potocznie płaskim miejscem. W tym miejscu ze względu na krótkotrwałe działanie wysokiej temperatury następuje przemiana w strukturze koła na twardy martenzyt [46, 120]. W konsekwencji konieczne jest przetoczenie zestawu kołowego w okresie między cyklami okresowego przeglądu i zmniejszenie średnicy koła. Stąd uzasadnione jest podjęcie takich działań zmierzających do maksymalnego wydłużenia czasu użytkowania zestawu kołowego, opisane również w pracy [92].

3.2. Metodyka badań rozpoznawczych

Obiektem badań rozpoznawczych był elektryczny zespół trakcyjny EN97, który przeznaczony jest do obsługi pasażerskiego ruchu lokalnego o dużych gęstościach. Pojazd składa się z dwóch jednakowych trójczłonów połączonych ze sobą sprzęgiem rozłącznym (rys. 3.1) zgodnie z [10, 11]. Układ osi pojazdu to $(Bo'2'Bo')+(Bo'2'Bo')$. Trójczłonowy typu $n+t+n$ (człon napędny + człon toczny + człon napędny) pojazdu EN97 oparte są na trzech wózkach, osobo dla każdego członu, skrajne napędowe i środkowy wózek toczny, co

przedstawia rysunek 3.1. Widok ogólny elektrycznego zespołu trakcyjnego przedstawia rysunek 3.2. Natomiast na rysunku 3.3 przedstawiono widok wózka napędowego. Pojazd EN97 wyprodukowany został w 14 sztukach przez zakłady PESA Bydgoszcz S.A.



Rys. 3.1. Schemat trójczłonu pojazdu EN97: Cz1-Człon napędowy z kabiną sterowniczą, Cz2-Człon środkowy toczny, Cz3-Człon napędowy bez kabiny sterowniczej, W1n, W3n-Wózki napędne, W2t-Wózek toczny środkowy, ZK1-ZK6-Zestawy kołowe, Sc-Sprzęg czołowy, Smc-Sprzęg międzyczłonowy



Rys. 3.2. Widok członu napędowego pojazdu EN97 [fot. A.M. Rilo Cañás]



Rys. 3.3. Widok wózka napędowego 34MN z widoczną przekładnią i silnikiem trakcyjnym [fot. A.M. Rilo Cañás]

Istotną cechą odróżniającą oba wózki (napędowy i toczny) oprócz ich przeznaczenia to rozstaw osi zestawów kołowych (baza wózka). W przypadku wózków napędowych 34 MN rozstaw osi wynosi 2300 mm, natomiast w wózkach tocznych 43AN – 2100 mm. Na każdym wózku napędowym zamocowane są dwa silniki trakcyjne o mocy 180 kW każdy [11]. Dodatkowe dane techniczne zawarto w tabeli 3.1.

Tab. 3.2. Podstawowe dane o sieci linii kolejowych Warszawskiej Kolei Dojazdowej [76]

Lp.	Nr linii	Stacja początkowa i końcowa	Długość linii w km	
			Odcinek jednotorowy	Odcinek dwutorowy
1	47	Grodzisk Mazowiecki Radońska – Warszawa Śródmieście WKD	7,544	25,070
2	48	Podkowa Leśna Główna – Milanówek Grudów	2,896	–
SUMA			35,510	

Badania zużycia kół zestawów kołowych pojazdów serii EN97 przeprowadzone były na podstawie analizy wyników parametrów geometrycznych zestawów kołowych zapisywanych podczas przeglądu *P2* zgodnie z cyklem przeglądowo naprawczym zawartym w dokumentacji systemu utrzymania (tabela 3.3).

Tab. 3.3. Cykle przeglądów i napraw elektrycznego zespołu trakcyjnego 33WE serii EN97 [10]

Lp.	Poziom utrzymania	Maksymalny przebieg w km	Maksymalny czas
1	P1	1 800 km	co 72 h
2	P2	12 000 km	30 dni
3	P3	125 000 km	12 m-cy
4	P4	500 000 km	4 lata
5	P5	1 500 000 km	12 lat

Uwaga: Uruchomienie prac przeglądowych i naprawczych powinno nastąpić w zależności od parametru, który zostanie osiągnięty jako pierwszy (przebieg w kilometrach lub upływ dni).

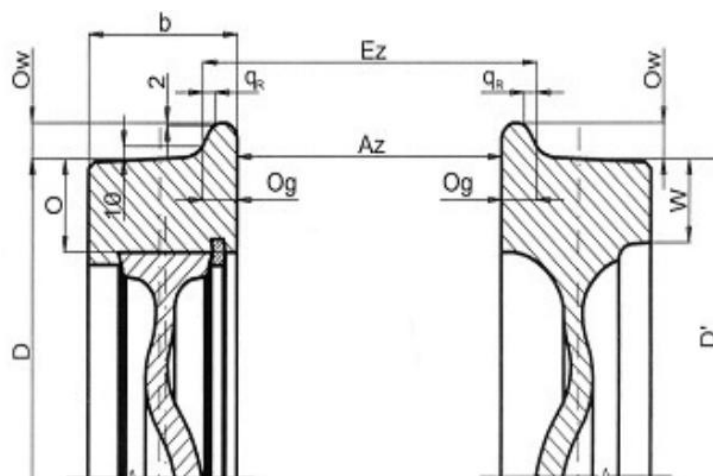
Badania rozpoznawcze przeprowadzone zostały w dwóch etapach. Pierwszym celem tych badań było określenie na podstawie zebranych danych z pomiarów geometrycznych zestawów kołowych liczebności wystąpienia przekroczenia danego parametru zestawu kołowego poza granicę tolerancji określone w dokumentacji DSU. Analizowanymi parametrami geometrycznymi były wysokość i grubość obrzeża, stromość obrzeża, średnica okręgu tocznego, odległość między wewnętrznymi powierzchniami obręczy w zestawie kołowym bez obciążenia i odległość między zarysami obrzeży tzw. szerokość prowadza. Na tej podstawie określony został ranking parametrów najczęściej przekraczanych podczas pomiarów geometrycznych zestawów kołowych w wyniku toczenia się zestawów kołowych po torach WKD.

Badania te zostały przeprowadzone dla wszystkich pojazdów serii EN97 tj. dla 14 sztuk. Tabela 3.4 przedstawia przykładowe wyniki do dalszej analizy zebrane z pierwszego pojazdu EN97, którego trójczłonowy oznaczenie są numerami 002A i 002B. Dodatkowo w tabeli 3.4 przedstawiono tolerancje jakie muszą być zachowane dla poszczególnych parametrów profilu koła. Na rysunku 3.5 przedstawiono przekrój koła z zaznaczonymi parametrami opisującymi profil koła. W przypadku średnicy koła *D* zgodnie z DSU pojazdu narzucony jest dodatkowy warunek, że różnica między kołami tej samej osi (koło prawe i lewe) nie może przekraczać 1 mm, różnica między średnicami kół w kolejnym zestawie kołowym w wózku nie może przekroczyć 2 mm. Natomiast różnica między poszczególnymi kołami na całym pojeździe elektrycznego zespołu trakcyjnego nie może przekraczać 5 mm [10]. Ten warunek wynika z faktu zachowania zbliżonych intensywności zużycia kół i równomiernego rozkładu nacisków na poszczególnych kołach.

Tab. 3.4. Liczebność przekroczenia parametrów zestawu kołowego poza granice tolerancji zawarte w DSU pojazdu EN97 o numerach 002A i 002B

Trójczłon 002A							Trójczłon 002B						
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Ow	-	-	-	-	-	-	Ow	-	-	-	-	-	-
Og	1	1	-	2	-	1	Og	1	-	3	-	1	-
qR	7	6	5	5	2	4	qR	8	8	7	4	5	2
Ogl+Ogp	-	1	-	1	-	-	Ogl+Ogp	1	-	2	-	-	-
D	6	4	8	4	2	2	D	5	4	11	8	7	8
Az	-	-	-	-	-	-	Az	-	-	-	-	-	-
Ez	-	1	-	1	-	1	Ez	1	-	2	-	-	-
Przebieg pojazdu	81 190 km						Przebieg pojazdu	81 190 km					
Okres eksploatacji	19.04.2012 – 03.07.2014						Okres eksploatacji	19.04.2012 – 03.07.2014					
Liczba pomiarów	20						Liczba pomiarów	19					
Liczba przetoczeń ZK	3						Liczba przetoczeń ZK	3					
Przebiegi przetoczeń	I-4385 km, II-44800 km, III-51465 km						Przebiegi przetoczeń	I-4385 km, II-44800 km, III-51465 km					

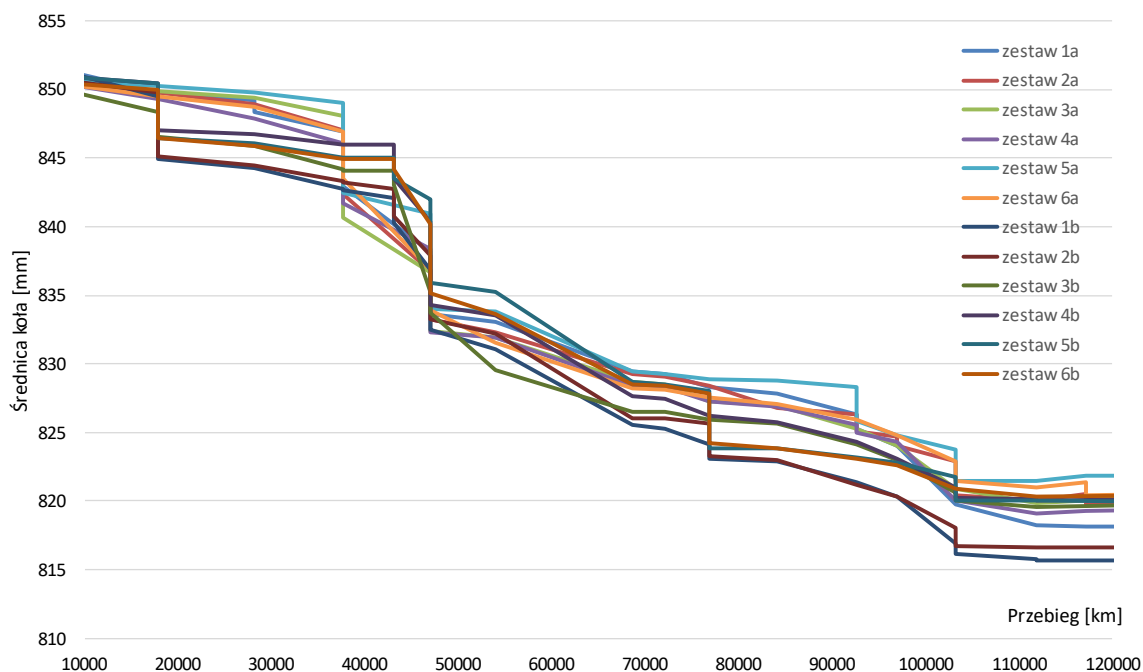
Ow– wysokość obrzeża (od 25 do 36 mm),
 Og– grubość obrzeża (od 22 do 33 mm),
 qR– stromość obrzeża (od 6,5 do 11 mm),
 Ogl+Ogp – suma grubości obrzeża koła lewego i prawego (od 48 do 66 mm),
 D– średnica okręgu tocznego (od 780 do 852 mm),
 Az – odległość między wewnętrznymi powierzchniami obręczy w zestawie kołowym bez obciążenia (od 1357 do 1363 mm),
 Ez – odległość między zarysami obrzeży tzw. szerokość prowadna (od 1410 do 1426 mm).



Rys. 3.5. Przekrój koła obręczowanego i monoblokowego z zaznaczonymi parametrami geometrycznymi [33]

Drugim etapem prac w ramach badań rozpoznawczych było wyznaczenie charakterystyk zmiany wybranego parametru zestawu kołowego w funkcji przebiegu lub czasu użytkowania pojazdu. Wspomniany parametr ZK został wyznaczony po analizie statystycznej liczebności występowania przekroczenia poza granice określone w dokumentacji systemu utrzymania

pojazdów serii EN97. Na rysunku 3.6 przedstawiono zbiorcze przebieg zmiany średnic kół elektrycznego zespołu trakcyjnego w funkcji przebiegu pojazdu o numerze 004.

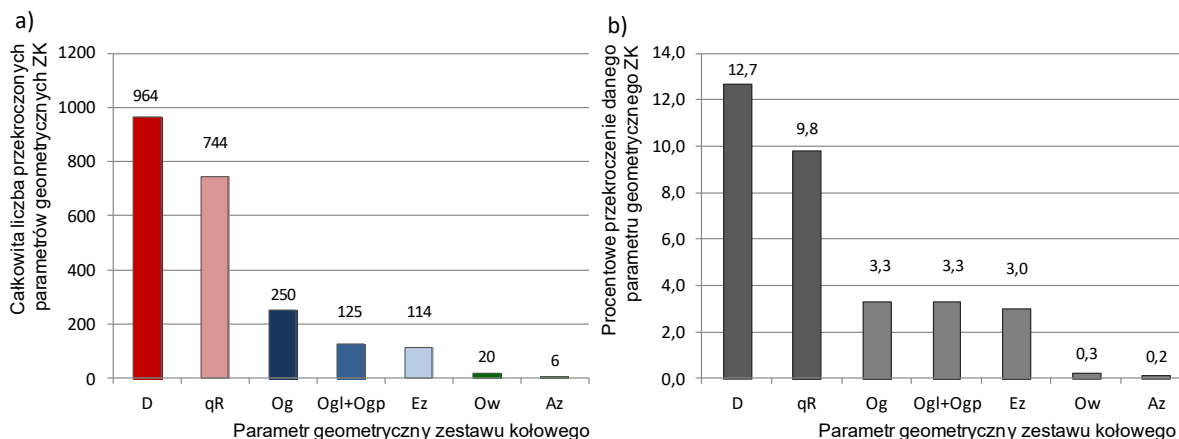


Rys. 3.6 Zbiorcze zestawienie zmiany średnicy kół prawych pojazdu 004 serii EN97

Wstępna analiza danych zawartych w tabeli 3.4 oraz zmian średnic kół pojazdu 33WE (EN97) dowodzi o nierównomierności zużycia zarówno wybranych parametrów geometrycznych zestawów kołowych stwierdzonego podczas przeglądu P2 jak również nierównomiernego zużycia danego parametru (np. średnicy koła) w czasie użytkowania wyrażonego przebiegiem pojazdu. Badania rozpoznawcze zostały opracowane na liczbie 41712 wyników parametrów wielkości geometrycznych zestawów kołowych uzyskanych z eksploatacji 14 pojazdów serii EN97 z okresu dwóch lat. Średnia liczba wykonanych przeglądów P2 na pojazdach w tym okresie (od 2012 do 2014) to 22 przeglądy. Maksymalna liczba przeglądów P2 to 30 na pojeździe o numerze 008, a minimalna liczba przeglądów to 18, stwierdzona na pojeździe o numerze 006. Różna liczba wykonanych przeglądów P2 świadczy o nierównomierności zużycia zestawów kołowych kursujących na tej samej.

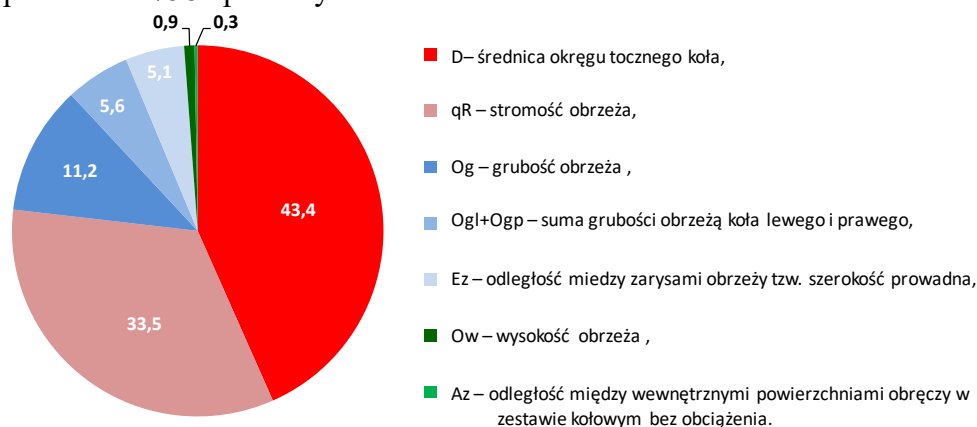
3.2.1 Wyniki badań parametrów geometrycznych profilu koła kolejowego pojazdu EN97

Na rysunku 3.7 a) przedstawiono zestawienie ilościowe przypadków przekroczenia danego parametru zestawu kołowego do wymagań zawartych w Dokumentacji Systemu Utrzymania, stwierdzone podczas przeglądu P2. Natomiast na rysunku 3.7 b) przedstawiono zestawienie procentowe przekroczenia danego parametru zestawu kołowego odniesione nie do wszystkich pomiarów ZK, a jedynie do pomiarów danego parametru. Na przykład przekroczona średnica koła w okręgu tocznym stanowi 12,7% wszystkich pomiarów średnic kół tj. 7584 wykonanych na 14 pojazdach w tym samym okresie (ponad 2 lat) w czasie przeglądu poziomu P2. Rysunek 3.8 jest zbiorczym procentowym zestawieniem przypadków przekroczenia danego parametru zestawu kołowego odniesione do sumy wszystkich przekroczeń parametrów (D , qR , Og , $Ogl+Ogp$, Ez , Ow i Az) tj. 2223 przypadków, charakteryzujących profil koła badanych zestawów kołowych.



Rys. 3.7. Zestawienie a) ilościowe, b) procentowe przekroczeń danego parametru zestawu kołowego podczas przeglądu P2 dla badanych 14 pojazdów w okresie 2 lat, *D* – średnica okręgu tocznego, *qR* – stromość obrzeża, *Og* – grubość obrzeża, *Ogl+Ogp* – suma grubości obrzeża koła lewego i prawego, *Ez* – odległość między zarysami obrzeży, *Ow* – wysokość obrzeża, *Az* – odległość między wewnętrznymi powierzchniami obręczy w zestawie kołowym bez obciążenia,

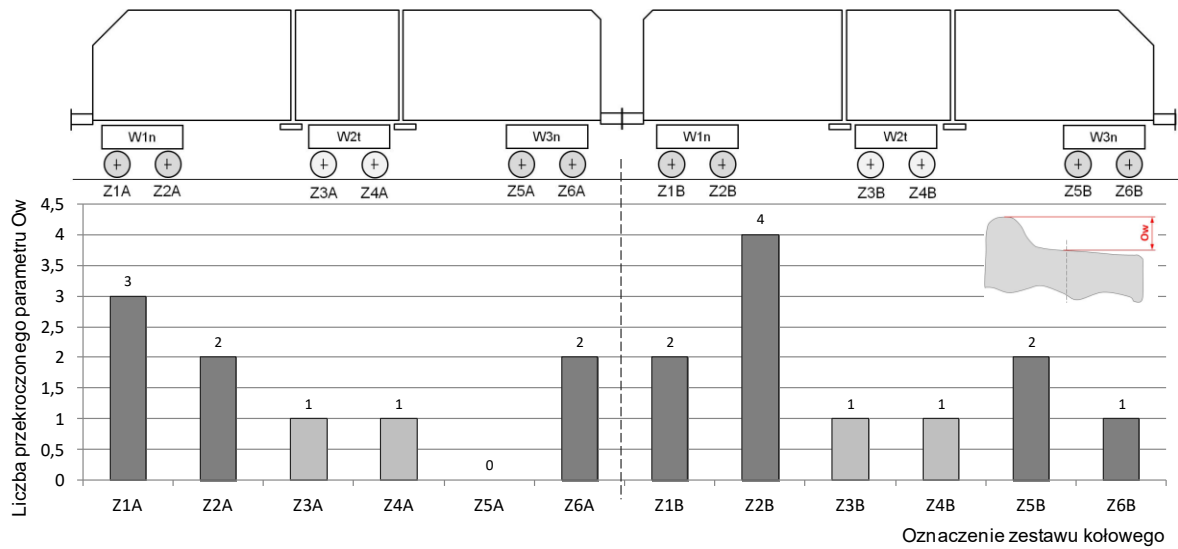
Zarówno analiza wyników w ujęciu ilościowym jak i procentowym przekroczenia parametrów geometrycznych opisujących zestaw kołowych dowodzi, że średnica koła w okręgu tocznym była stwierdzana najczęściej podczas pomiarów zestawu kołowego w czasie przeglądów P2. Było to prawie 1000 na 7584 pomiary średnic kół w okresie ponad 2 lat użytkowania elektrycznych zespołów trakcyjnych. Na drugim miejscu pod względem przekroczonych parametrów do wymagań DSU była stromość obrzeża *qR* z wynikiem prawie 750 przypadków na 7584 pomiary.



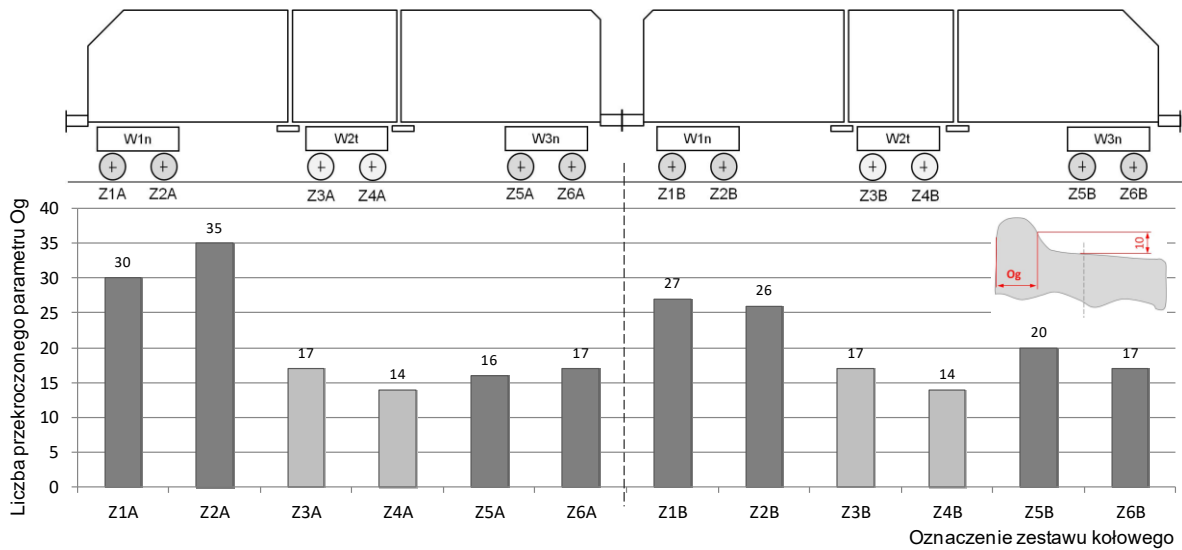
Rys. 3.8. Zestawienie procentowe przekroczeń danego parametru ZK do wszystkich stwierdzonych w czasie P2 przekroczeń parametrów geometrycznych

Natomiast kolejnymi parametrami po średnicy *D* i stromości *qR*, są grubość obrzeża *Og*, suma grubości obrzeża lewego i prawego *Ogl+Ogp* oraz odległość między zarysami obrzeży *Ez*.

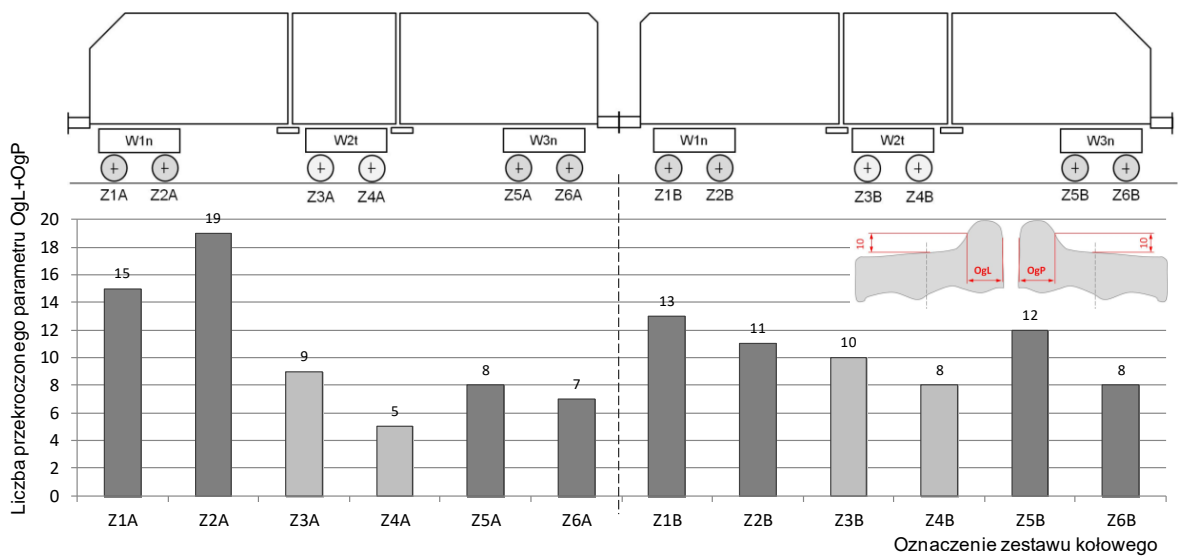
Na rysunkach 3.9-3.12 przedstawiono zbiorcze dla wszystkich 14 pojazdów liczbę przekroczeń poza granice zawarte w DSU parametrów charakteryzujących zestaw kołowy. Wymienione parametry z przekroczeniami stwierdzone zostały podczas wykonywanych cyklicznie przeglądów poziomu P2. Natomiast na rysunkach 3.13-3.15 w sposób graficzny przedstawiono liczbę przekroczonego parametru związanego ze średnicą koła *D*, odległość między zarysami obrzeży (tzw. szerokości prowadna *Ez*) i *Az*, tj. odległości między wewnętrznymi powierzchniami obręczy w zestawie kołowym bez obciążenia.



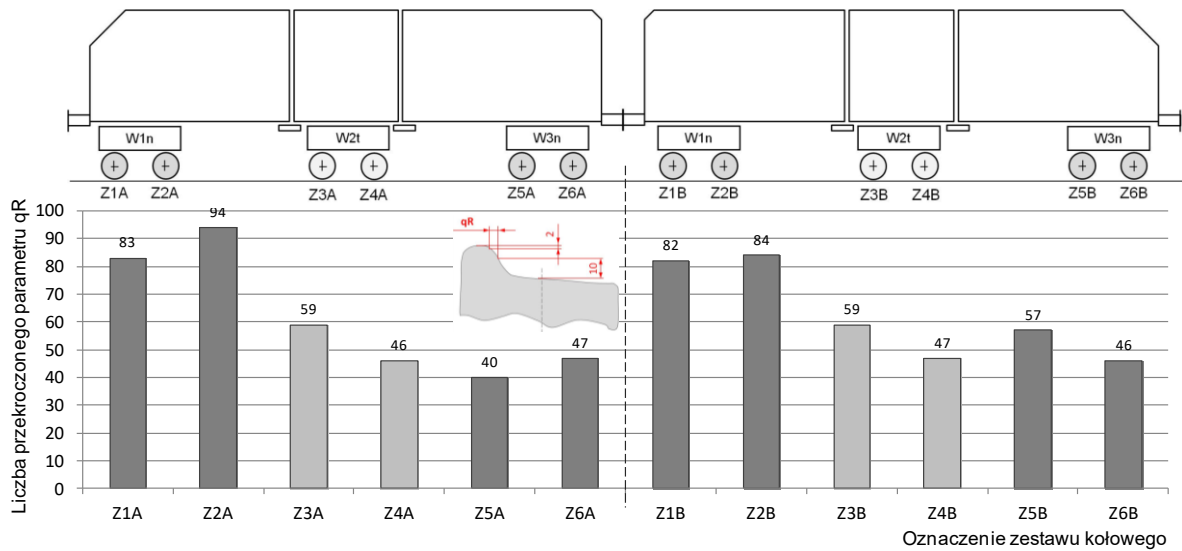
Rys. 3.9. Liczba przekroczenia parametru wysokości obrzeża O_w podczas przeglądów P2



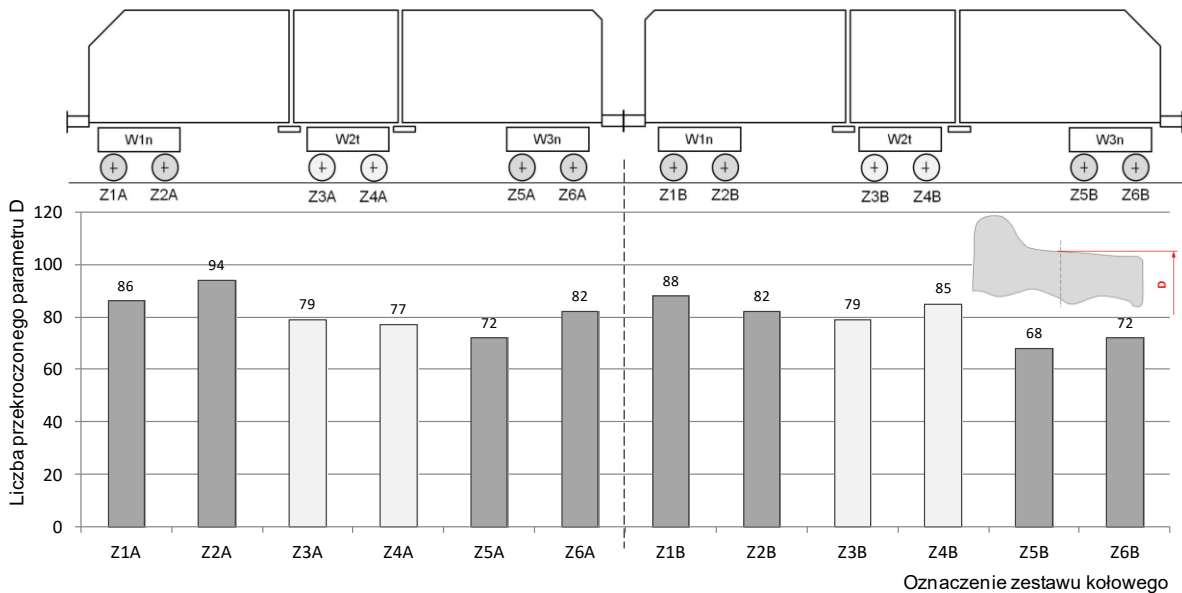
Rys. 3.10. Liczba przekroczenia parametru grubości obrzeża O_g podczas przeglądów P2



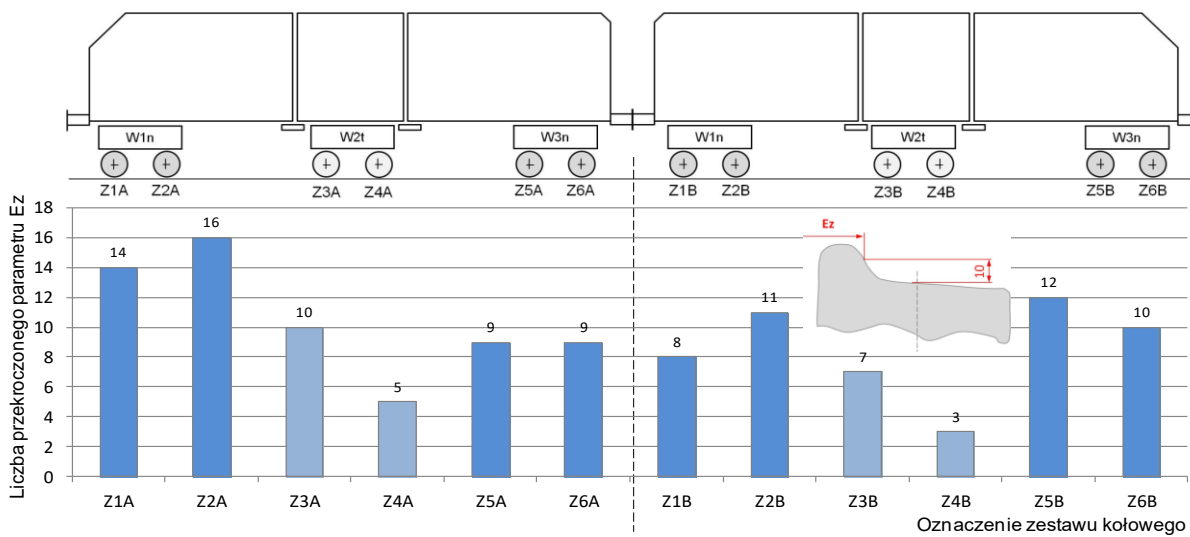
Rys. 3.11. Liczba przekroczenia parametru sumy grubości obrzeża $O_{gl}+O_{gp}$ podczas przeglądów P2



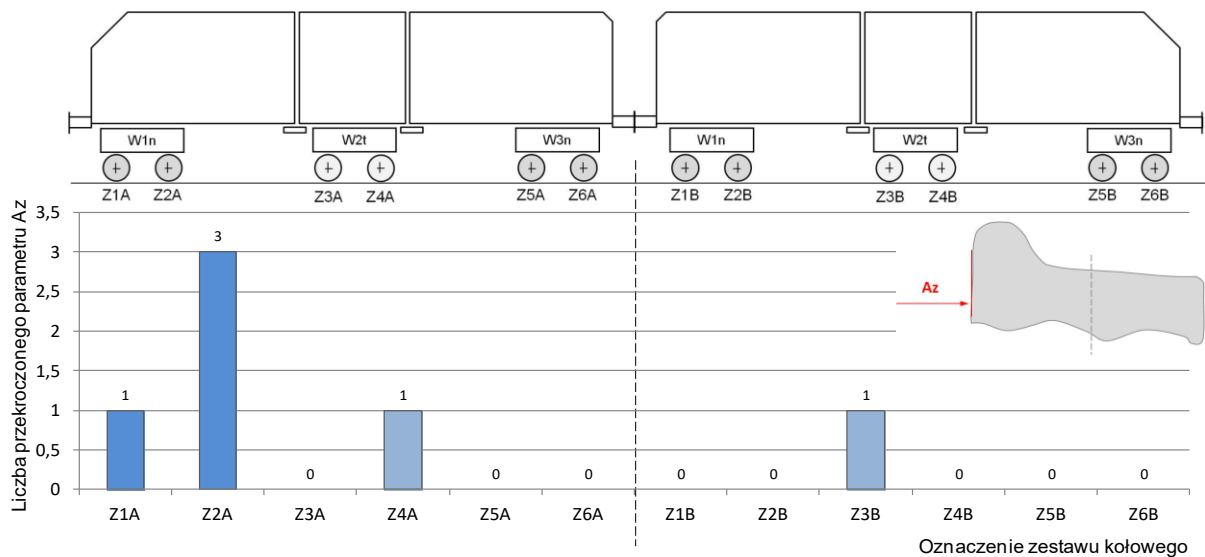
Rys. 3.12. Liczba przekroczenia parametru stromości obrzeża qR podczas przejazdów P2



Rys. 3.13. Liczba przekroczenia parametru średnicy koła D podczas przejazdów P2



Rys. 3.14. Liczba przekroczenia parametru odległości między zarysami obrzeży Ez , tzw. szerokości prowadna stwierdzona podczas przejazdów P2



Rys. 3.15. Liczba przekroczenia parametru odległości między wewnętrznymi powierzchniami obręczy w zestawie kołowym bez obciążenia A_z przeglądów P2

Analizując dane przedstawione na rysunkach 3.9-3.15 liczby przekroczeń parametrów geometrycznych badanych zestawów kołowych stwierdza się, że zdecydowana większość wspomnianych przekroczeń parametrów miała miejsce na drugim zestawie kołowym pierwszego członu (zestaw kołowy Z2A), co stwierdzono na 6 z 7 parametrów opisujących geometrię koła kolejowego. Na drugim miejscu w zakresie przekroczonych parametrów geometrycznych stwierdzono na pierwszym zestawie pierwszego (A) i drugiego trójczłonu Pojazdu EN97 (zestawy kołowe Z1A i Z1B), co zaobserwowano na 4 z 7 analizowanych parametrów zestawów kołowych. Dokładne zestawienie przypadków najczęściej występujących przedstawia tabela 3.5.

Tab. 3.5. Zbiorcza liczebność przekroczenia parametrów zestawu kołowego poza granice tolerancji zawarte w DSU z podziałem na poszczególne zestawy kołowe badanych pojazdów EN97

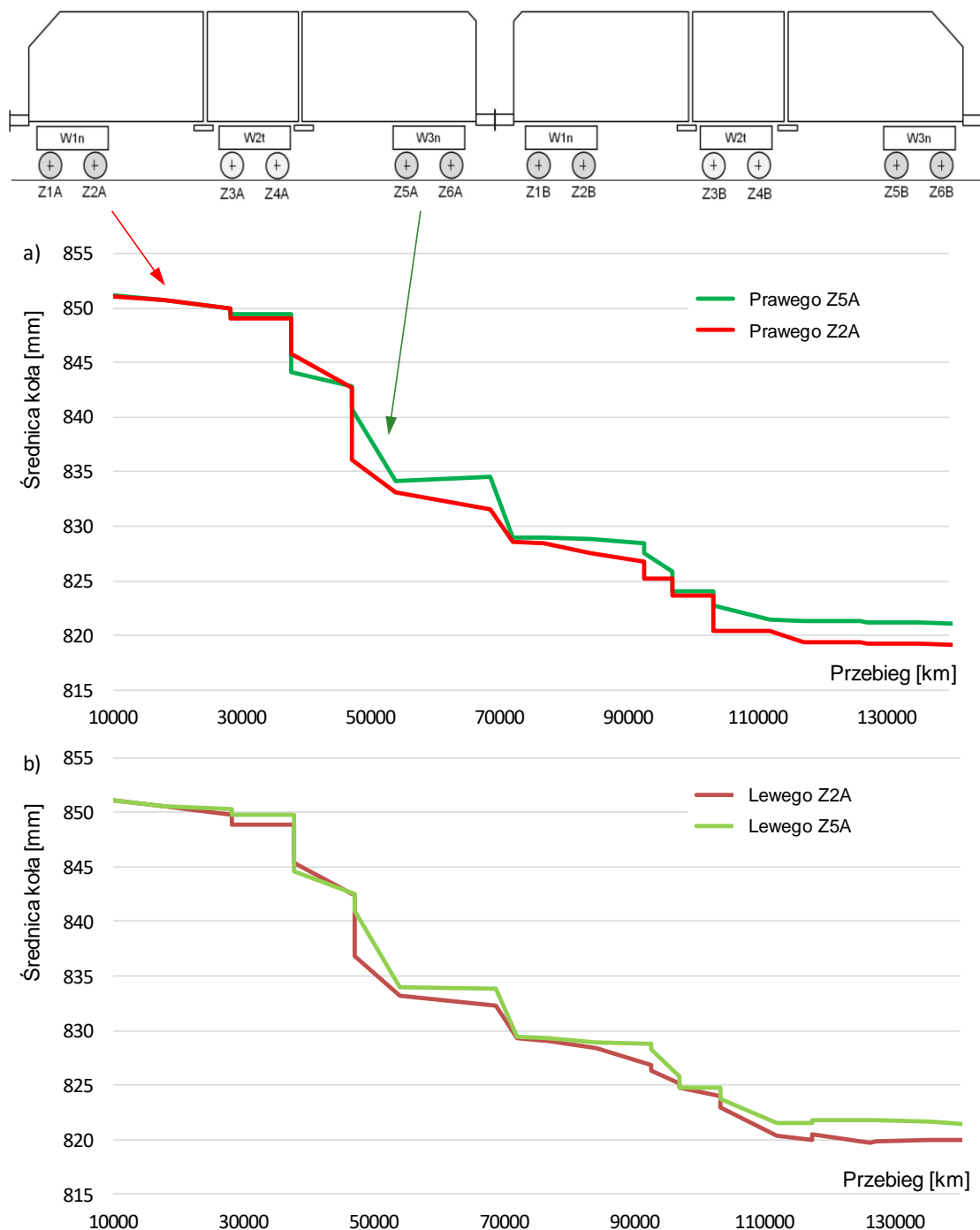
	Trójczłon A						Trójczłon B					
	Z1A	Z2A	Z3A	Z4A	Z5A	Z6A	Z1B	Z2B	Z3B	Z4B	Z5B	Z6B
D	88	94				82	86	82				
qR	83	94					82	84				
Og	30	35					27	26				
Ogl+Og	15	19					13	11			12	
p												
Ez	14	16						11			12	
Ow	3	2				2	2	4			2	
Az	1	3		1					1			

Uwaga: Kolorami zaznaczono intensywność występowania danego przekroczenia na danym zestawie kołowym

W przypadku pozostałych zestawów kołowych występujących na wózkach środkowych tocznych (3A, 4A, 3B, 4B) i ostatnich napędnych (5A, 6A, 5B, 6B) zaobserwowano znacznie mniejsze (prawie dwukrotnie) przekroczenie danego parametru opisującego geometrię zestawu kołowego.

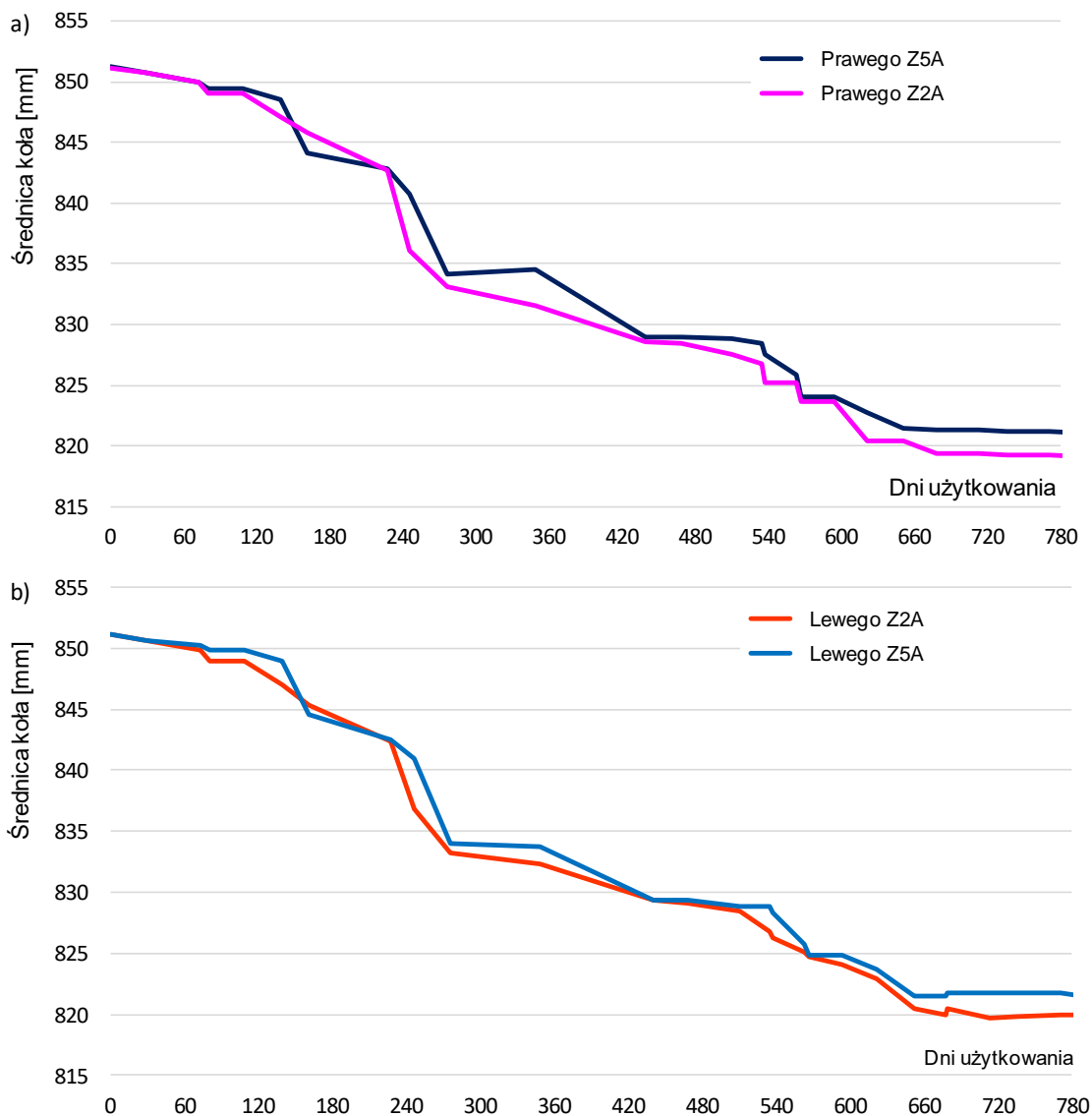
3.2.2. Wyniki badań zużycia zestawów kołowych pojazdu EN97

W zakresie realizacji drugiego celu badań rozpoznawczych wyznaczono charakterystyki zmiany średnicy kół wybranych pojazdów serii EN97 w funkcji przebiegu i czasu użytkowania. Średnica koła jako parametr geometryczny profilu koła został wybrany na podstawie wcześniejszych analiz, z których wynikało, że stanowił on największą liczbę przypadków przekroczenia poza wymagania zawarte w DSU. Na rysunku 3.16 przedstawiono charakterystykę zmiany średnicy kół dla zestawu Z2A, który z wcześniejszych analiz cechował się największą liczbą przypadków przekroczonego parametru względem średnicy kół na zestawie Z5A (najmniejsza liczba przekroczeń) dla trójczłonu 004A pojazdu EN97.



Rys. 3.16. Zmiana średnicy koła a) prawego, b) lewego zestawu Z2A i Z5A pojazdu 004A zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu

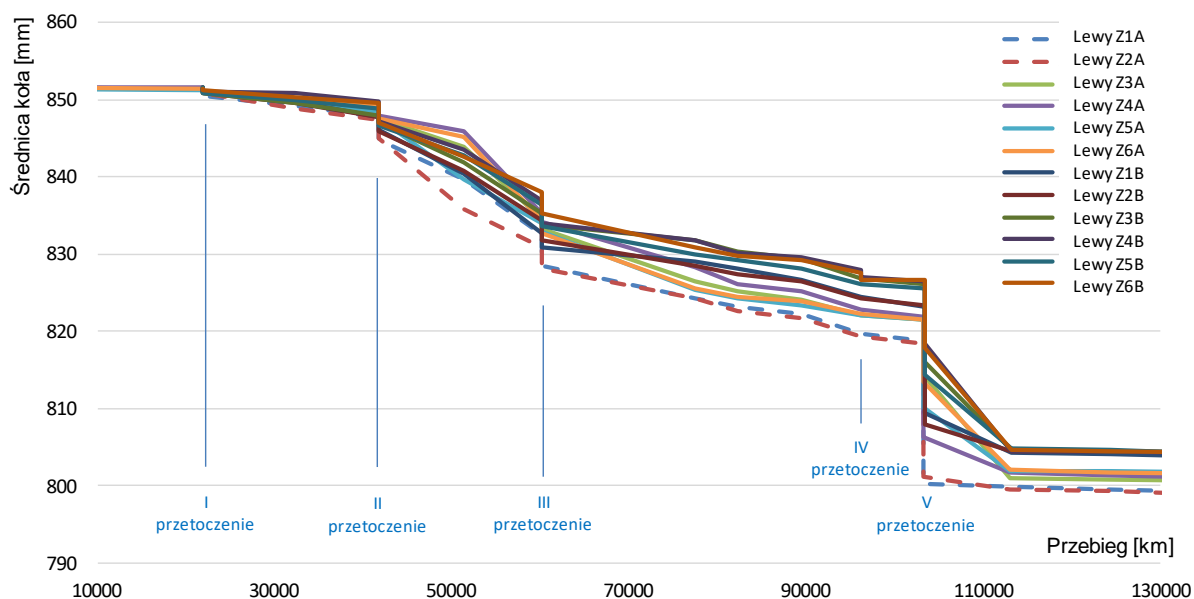
Natomiast na rysunku 3.17 przedstawiono graficznie zmianę (spadek) średnicy kół drugiego i piątego zestawu kołowego (Z2A i Z5A) pojazdu 004A w odniesieniu do czasu eksploatacji z uwzględnieniem czasu użytkowania tj. jazdy i czasu obsługi w celu wykonania niezbędnych czynności przewidzianych w ramach cyklu przeglądowo-naprawczego. W przypadku odniesienia zmiany średnicy kół do przebiegu pojazdu, w okresie dwóch lat pojazd 004 EN97 przejechał 141490 km, co w ujęciu dni eksploatacji wyniosło 797 dni.



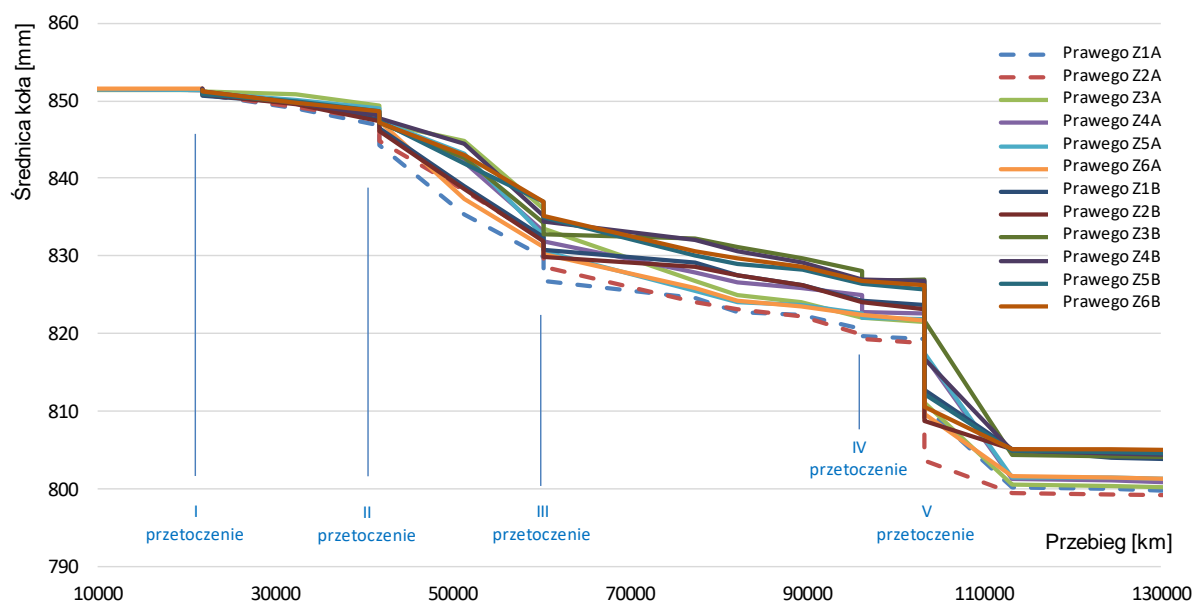
Rys. 3.17. Zmiana średnicy koła a) prawego, b) lewego zestawu Z2A i Z5A pojazdu 004A zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji czasu eksploatacji

Analizując rysunki 3.16 i 3.17 stwierdza się, że w ocenie porównawczej zmiany średnicy kół pojazdu lepiej jest odnosić do czasu eksploatacji. Różnice w średnicach kół w perspektywie długiego okresu oceny (analizy) są lepiej widoczne. Szczególnie w przypadku niewielkich zmian w średnicy kół D . Wspomniane różnice w przedziale od 850 do 780 mm stanowią kilka (maksymalnie do 5 mm). Jednak przedstawienie zmiany średnicy kół do czasu nie pozwala obserwować chwil czasowych związanych z przetoczeniem kół na nowy wymiar naprawczy. Mimo, że wspomniane przetoczenia wynoszą zgodnie z [33] około 0,25-0,5 mm. Dlatego w dalszych analizach zarówno zmiany średnicy kół jak i zużycie kół odnoszone będą do przebiegu pojazdu wyrażonego w kilometrach.

Na rysunkach 3.18-3.19 przedstawiono zbiorcze zestawienie zmiany średnicy wszystkich kół (lewych i prawych) w funkcji przebiegu pojazdu 006 EN97. Dodatkowo zaznaczono okresy w których dokonano przetoczeń średnicy kół.

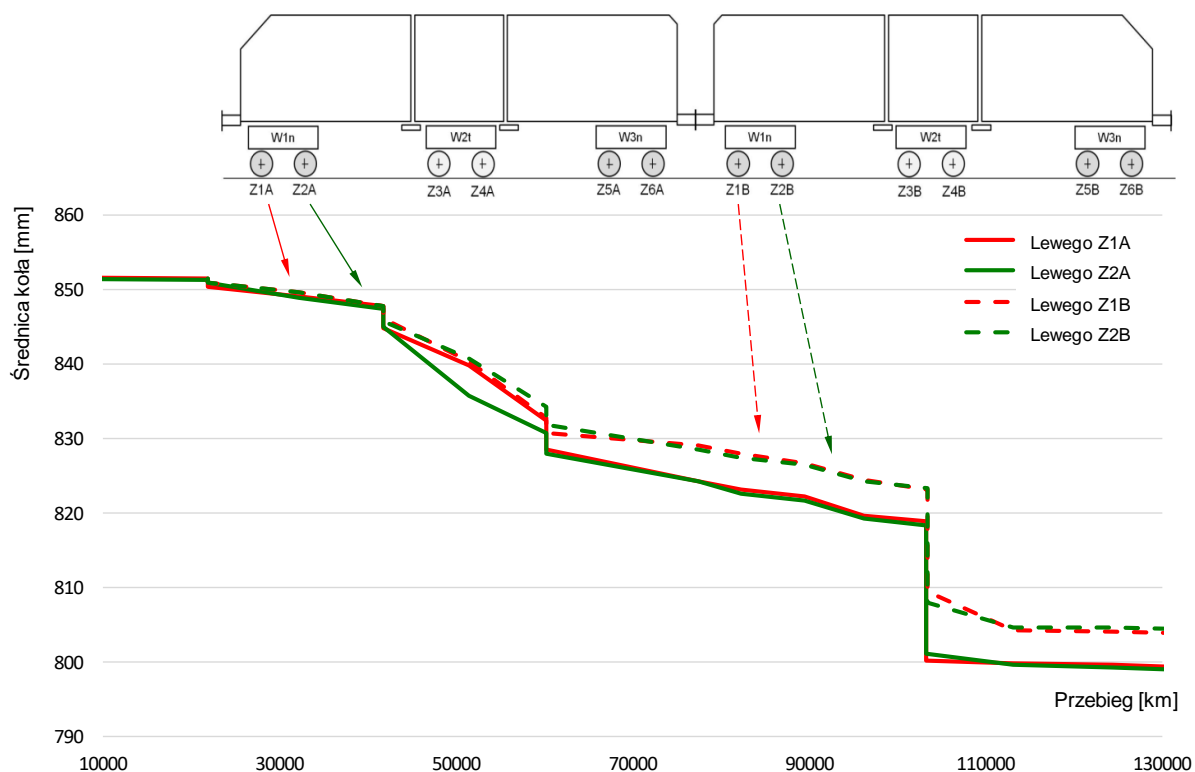


Rys. 3.18. Zmiana średnicy kół lewych pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu

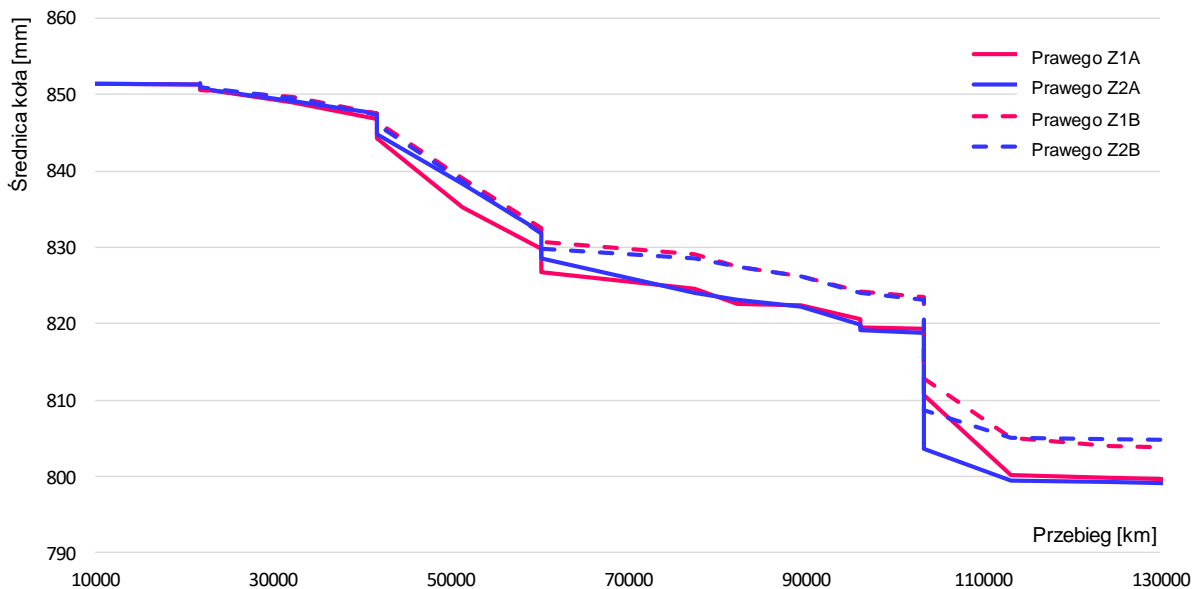


Rys. 3.19. Zmiana średnicy kół prawych pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu

Analizując zbiorcze wykresy przedstawione na rysunkach 3.18-3.19 stwierdza się, co zostało przedstawione liniami przerywanymi, że drugi zestaw pierwszego członu (Z2A) odznaczał się największym zużyciem (najmniejsza średnica kół) w przypadku kół lewych. Po trzecim przetoczeniu zużycie kół lewych pierwszego (Z1A) i drugiego (Z2A) zestawu kołowego było już porównywalne.



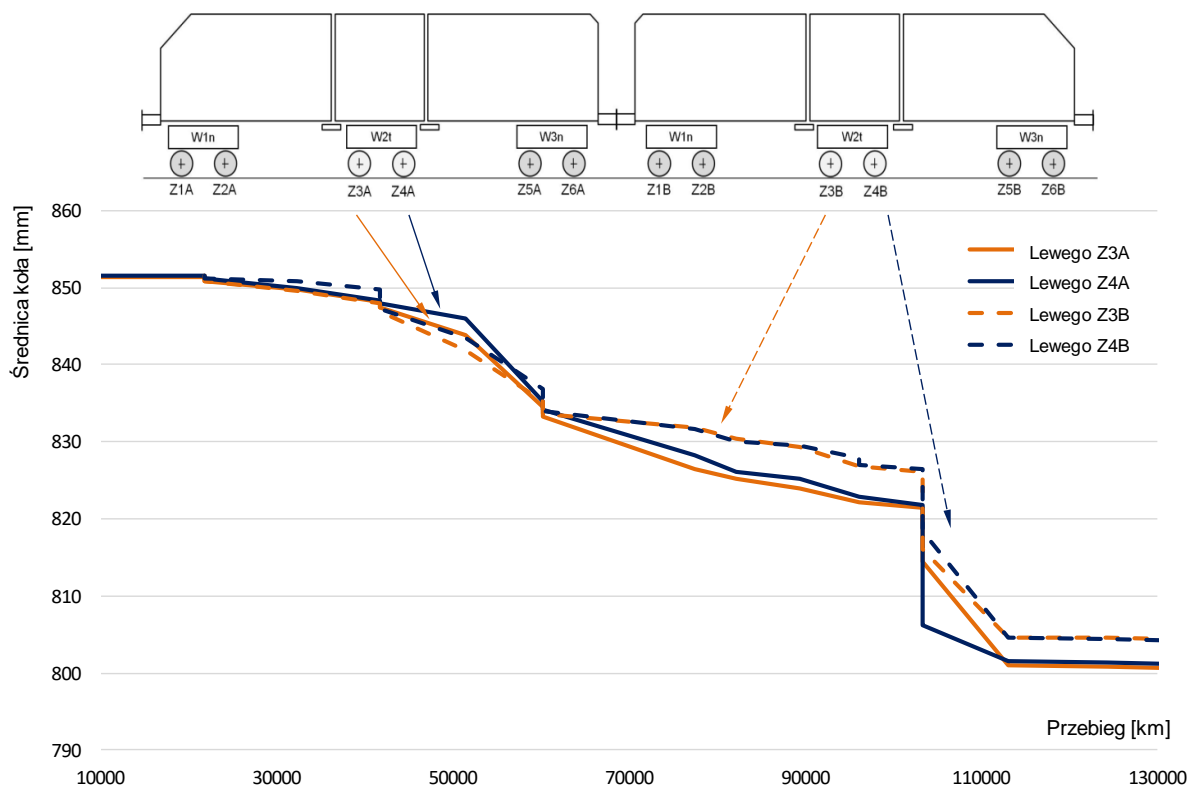
Rys. 3.20. Zmiana średnicy kół lewych pierwszego i drugiego zestawu kołowego na wózku napędnym pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



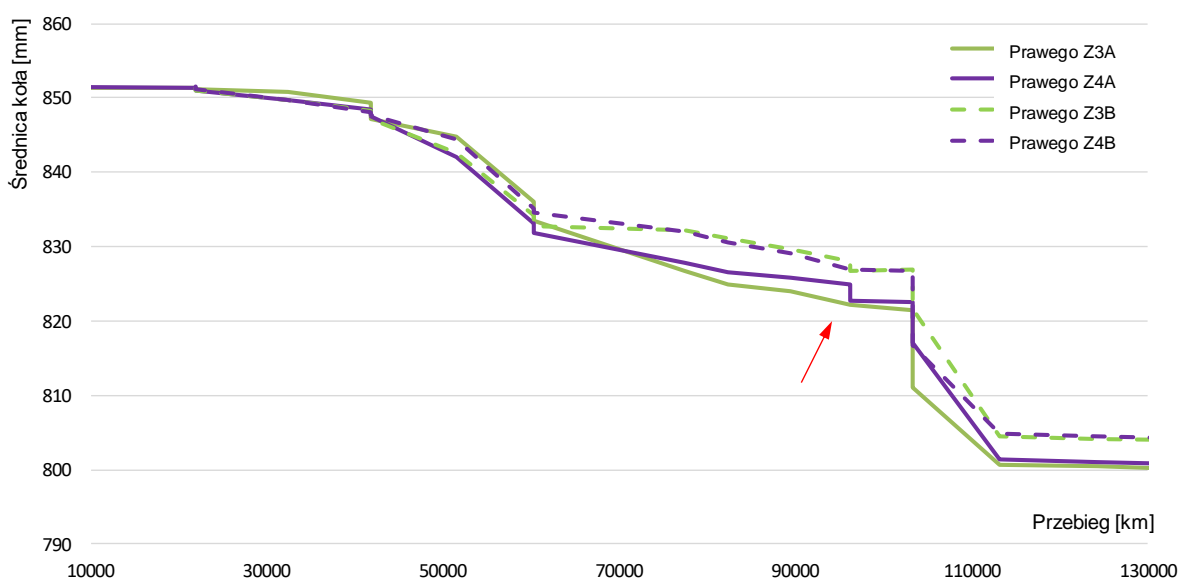
Rys. 3.21 Zmiana średnicy kół prawych pierwszego i drugiego zestawu kołowego na wózku napędnym pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu

Natomiast w przypadku kół prawych pojazdu 006 zużycie pierwszego zestawu kołowego (Z1A) było dominujące i największe do trzeciego przetoczenia kół. Po tym okresie, aż do czwartego przetoczenia zużycia kół pierwszego Z1A i drugiego Z2A zestawu było na tym samym poziomie (zbliżone średnice kół). Po czwartym przetoczeniu wybranych zestawów kołowych na tokarce, drugi zestaw kołowy Z2A dominował w zakresie zużycia i najmniejszej średnicy względem pozostałych prawych kół pojazdu 006 EN97 w dalszym jego użytkowaniu osiągając przebieg do kolejnego przeglądu P2 – 125404 km.

W celu porównania zamiany średnicy kół zestawów znajdujących się w tych samych wózkach (np. napędnych lub tocznych) na dwóch członach A i B, sporządzono charakterystyki przedstawione na rysunkach 3.20 – 3.25. W przypadku pierwszego wózka napędowego trójczłonu A i B stwierdza się dominację dwóch pierwszych zestawów kołowych Z1A i Z2A w zakresie przyspieszonego zużycia kół względem zestawów kołowych na drugim trójczłonie B tj. Z1B i Z2B. Na pierwszym wózku trójczłonu A zużycia kół są na zbliżonym poziomie, zdarzają się okresy po przetoczeniu kół gdzie raz intensywność zużycia jest większa na drugim, a raz na pierwszym zestawie pierwszego wózka.

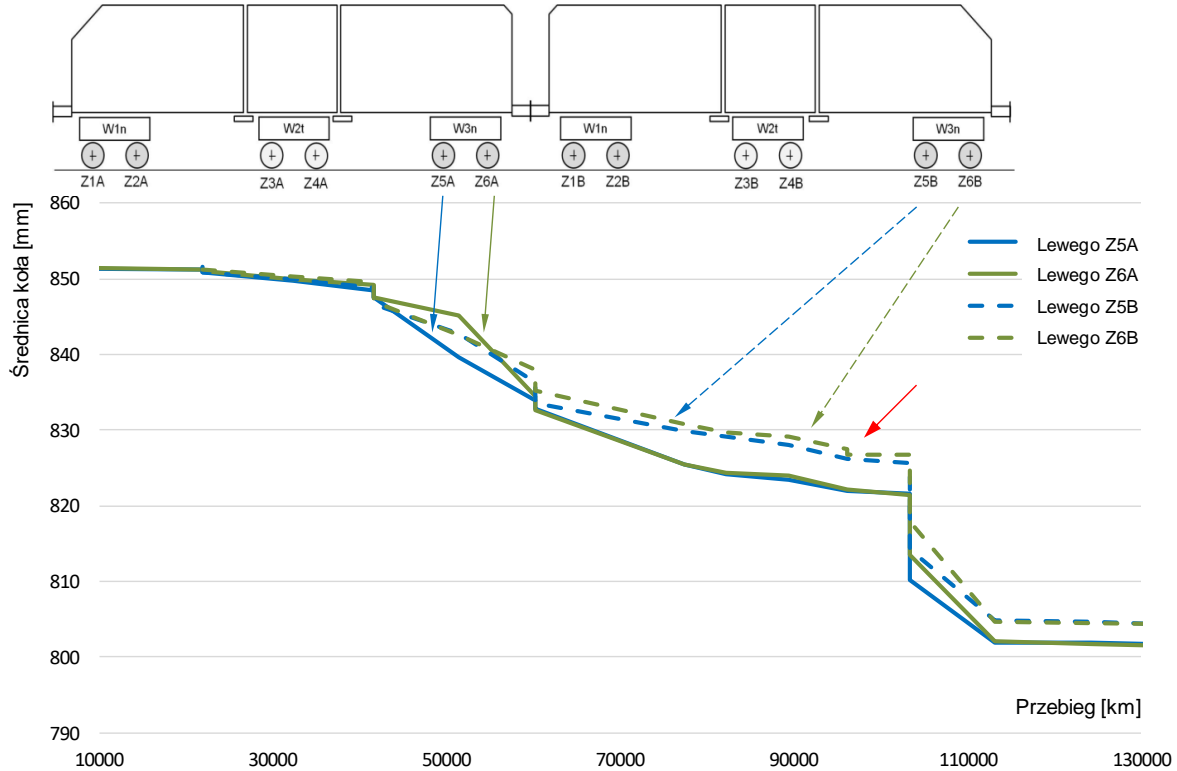


Rys. 3.22. Zmiana średnicy kół lewych trzeciego i czwartego zestawu kołowego na wózku tocznym pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu

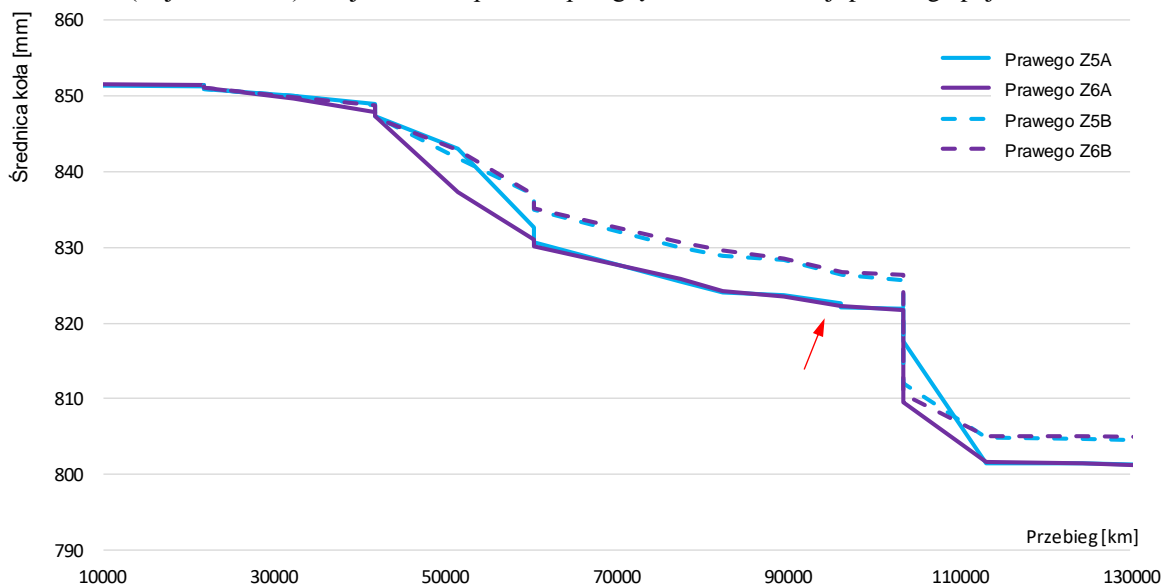


Rys. 3.23. Zmiana średnicy kół prawych trzeciego i czwartego zestawu kołowego na wózku tocznym pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu

W przypadku wózka środkowego (tocznego) na obu trójczłonach stwierdza się podobnie jak w przypadku pierwszego wózka napędowego, że zmiana (spadek, a tym samym zużycie) średnicy kół na trójczłonie A jest większa względem zestawów kołowych na środkowym wózku trójczłonu B. Strzałkami na wykresach dodatkowo przedstawiono okresy, w których dokonano przetoczenia tylko na wybranych kołach zestawu kołowego.



Rys. 3.24. Zmiana średnicy kół lewych piątego i szóstego zestawu kołowego na wózku napędym pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



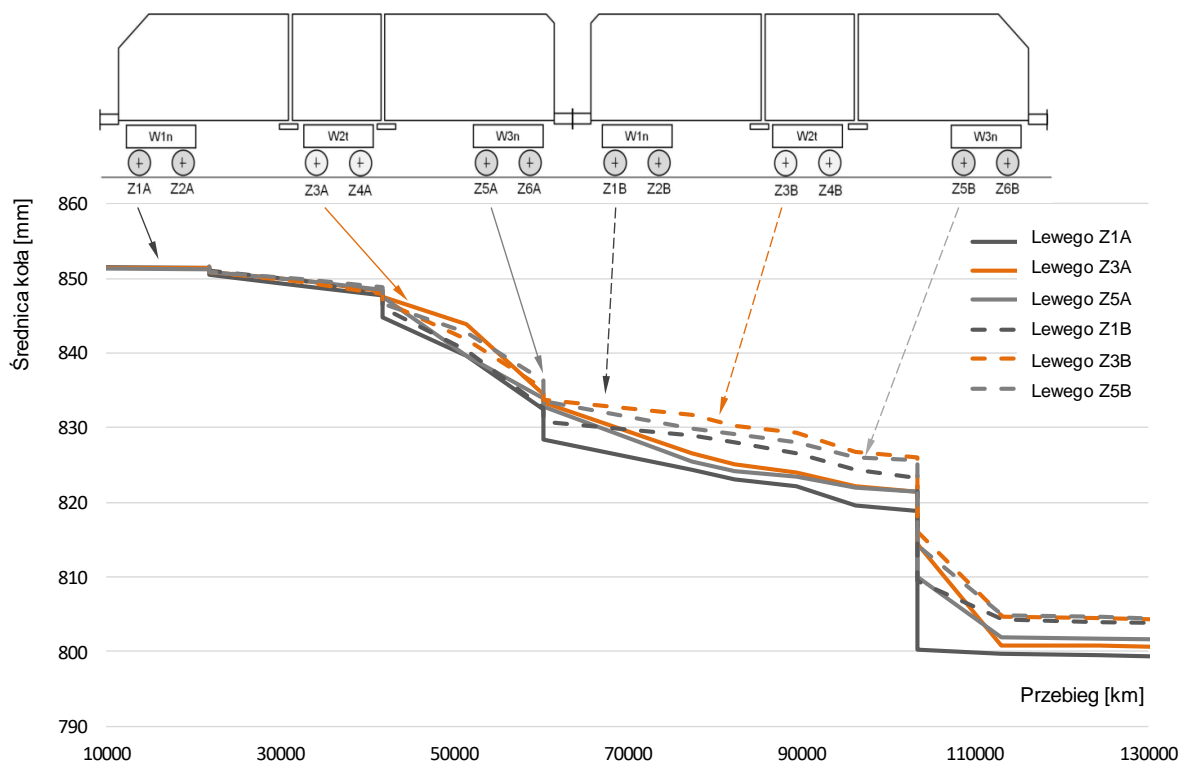
Rys. 3.25. Zmiana średnicy kół prawych piątego i szóstego zestawu kołowego na wózku napędym pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu

Na ostatnich wózkach napędowych trójczłonów A i B również jednoznacznie stwierdzono dominację w przyspieszonym zużyciu kół na trójczłonie A względem trójczłonu B. Zmiany

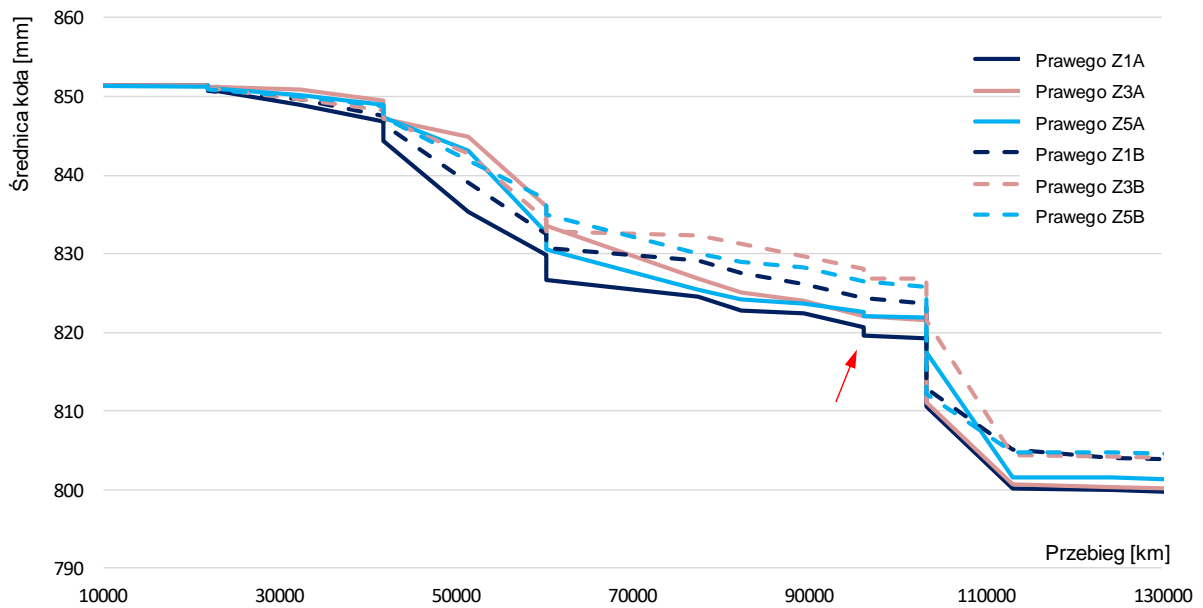
średnicy kół w ramach jednego wózka są na zbliżonym poziomie dlatego trudno jest jednoznacznie stwierdzić, czy pierwszy czy drugi zestaw kołowy cechował się większym zużyciem. W różnych okresach użytkowania pojazdów tendencja ta zmieniała się.

Następnie dokonano porównania zmiany średnicy kół na pierwszych i drugich zestawach kołowych wszystkich wózków pojazdu 004 EN97, co przedstawiają rysunki 3.26 (dla kół lewych) i 3.27 (dla kół prawych) dla pierwszych zestawów kołowych i rysunki 3.28-3.29 (lewych i prawych) dla drugich zestawów kołowych.

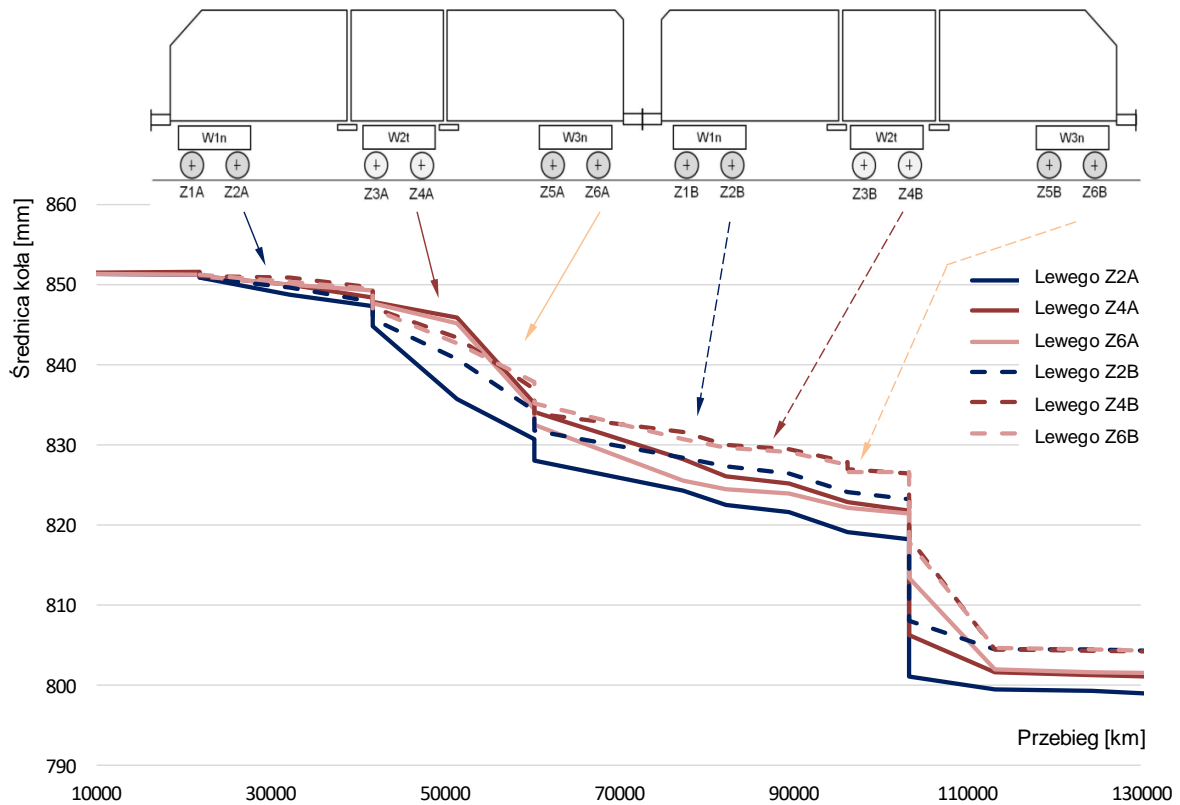
W każdym przypadku należy stwierdzić, że intensywność zużycia kół stwierdzona na podstawie zmiany średnicy kół była największa na pierwszym zestawie Z1A pierwszego wózka napędowego członu A. Następnie w kolejności należy wskazać pierwszy zestaw kołowy Z1B pierwszego wózka napędowego drugiego członu B. Taka sytuacja występowała do drugiego przetoczenia w połowie okresu eksploatacji pojazdu. Po drugim przetoczeniu kolejność (od największego do najmniejszego) zużyciu kół zużyciu jest następująca: Z1A, Z5A, Z3A, Z1B, Z5B i Z3B do przebiegu pojazdu 100500 km. Po tym okresie kolejność w intensywności zużyciu kół zmienia się z dominacją cały czas pierwszego zestawu kołowego w najszybszym zużyciu kół prawych i lewych na średnicy tocznej.



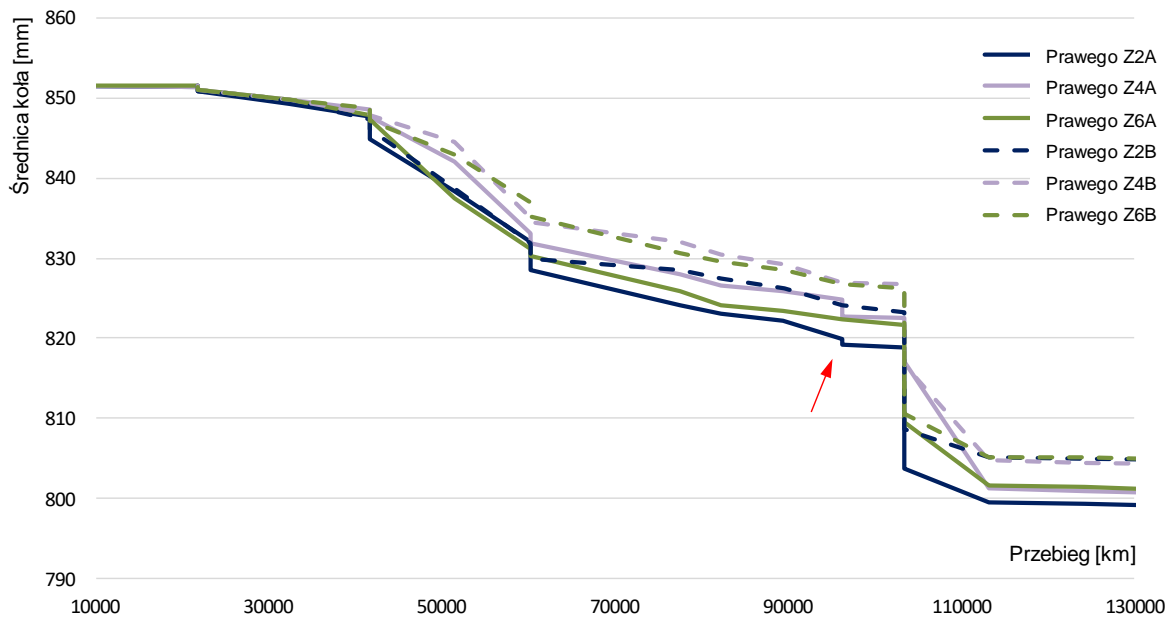
Rys. 3.26. Zmiana średnicy kół lewych pierwszego zestawu kołowego wszystkich wózków pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



Rys. 3.27. Zmiana średnicy kół prawych pierwszego zestawu kołowego wszystkich wózków pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



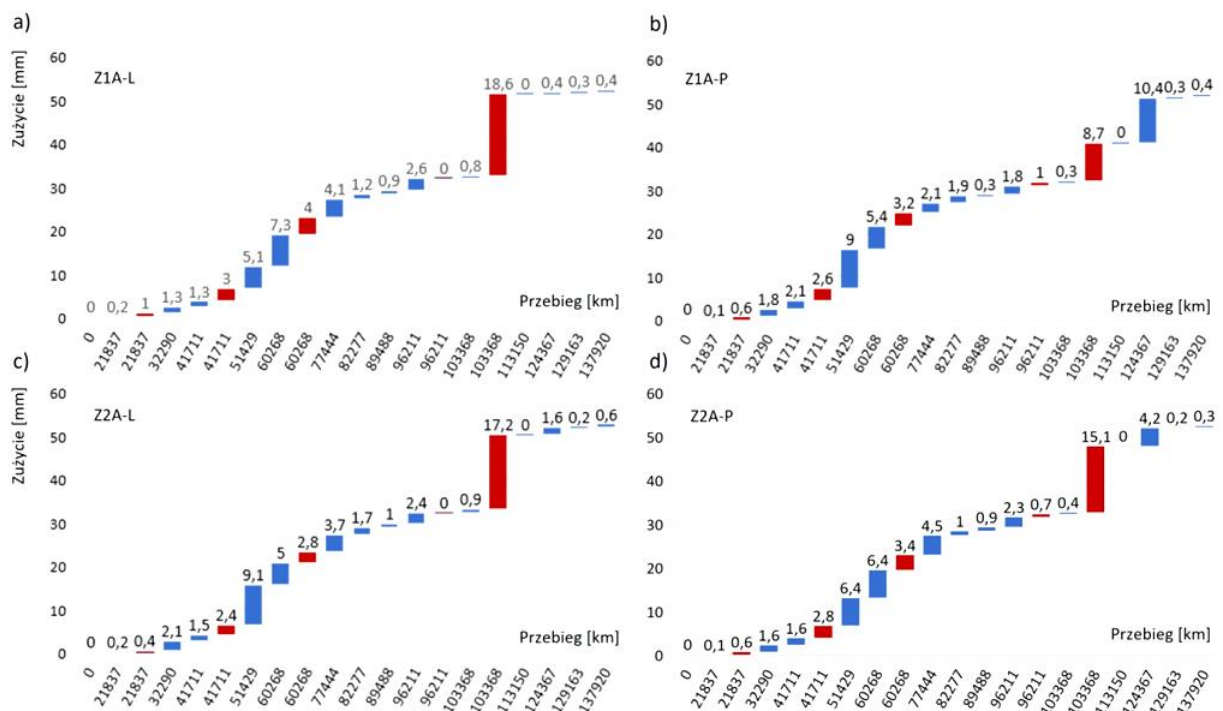
Rys. 3.28. Zmiana średnicy kół lewych drugiego zestawu kołowego wszystkich wózków pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



Rys. 3.29. Zmiana średnicy kół prawych drugiego zestawu kołowego wszystkich wózków pojazdu 006 (trójczłon A i B) zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu

W przypadku drugich zestawów wszystkich wózków pojazdu EN97 stwierdzono, że największy spadek średnicy kół miał miejsce na pierwszym wózku trójczłonu A (zarówno koło lewe i prawe) jak na pierwszym wózku trójczłonu B do połowy okresu użytkowania pojazdu oraz na trzecim lub zamiennie trzecim i drugim wózku również trójczłonu A.

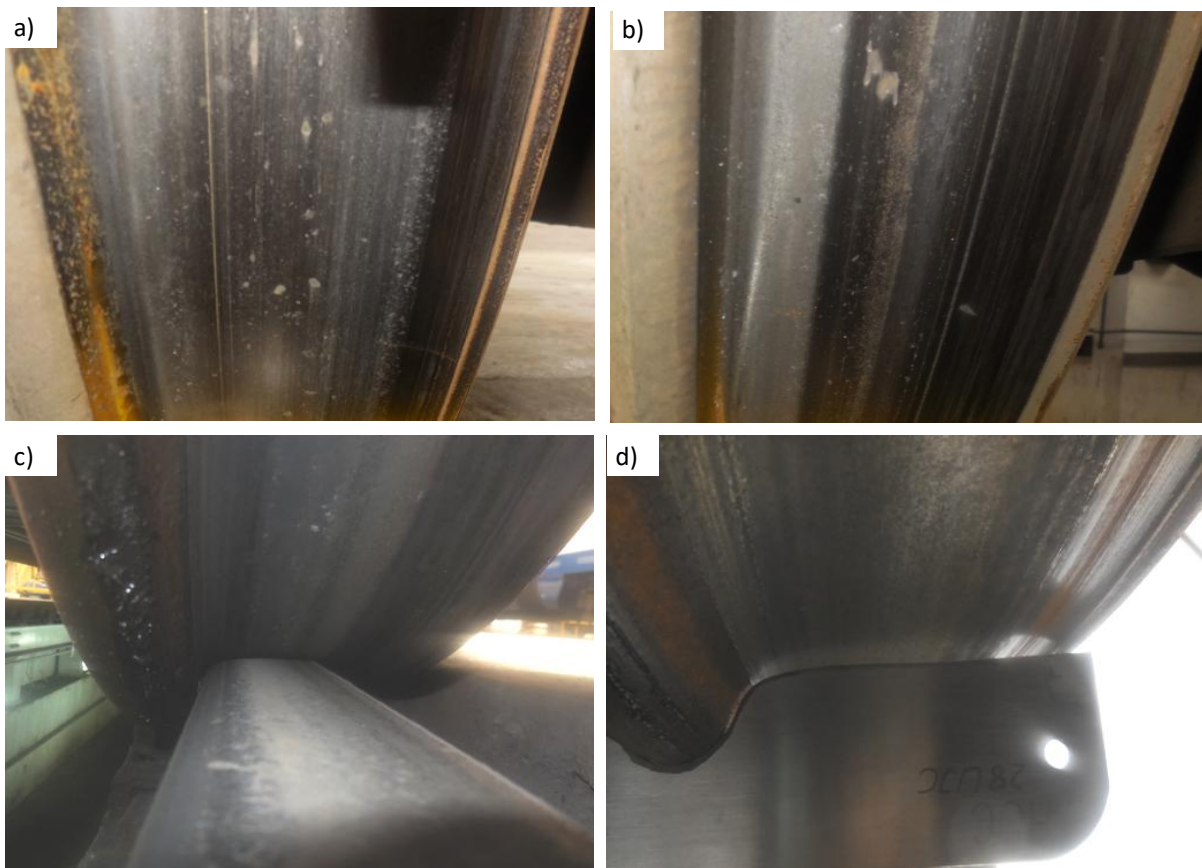
Na podstawie danych zebranych z pomiarów średnicy kół dla przykładowego pojazdu EN97 006 obliczono zużycie kół, co przedstawiono grupami dla wszystkich wózków na rysunkach 3.30-3.35. Rysunki 3.31-3.35 zamieszczono w załączniku A.



Rys. 3.30. Zużycie koła: a) Z1A-L, b) Z1A-P, c) Z2A-L, d) Z2A-P na pierwszym wózku (napędnym) pojazdu 006 (trójczłon A) zarejestrowane podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu, kolor czerwony – wartość przetoczenia koła na tokarce

Analizując dane przedstawione na rysunkach 3.30-3.35 stwierdza się, że wraz ze wzrostem przebiegu pojazdu i czasu jego użytkowania zwiększają się wymiary przetoczeń kół zestawów kołowych (kolor czerwony na rys. 3.30). Ponadto zaobserwowano na podstawie dwuletniej eksploatacji wszystkich pojazdów serii EN97 u przewoźnika, że w okresach jesienno-zimowych zużycie kół jest większe względem okresów wiosenno-letnich. Zaobserwowano to zarówno na wykresach zmiany średnicy kół jak i na wykresach kaskadowych zużycia na średnicy kół. Może być to związane z częstszym uruchamianiem klockowego hamulca ciernego wspomagającego pracę hamulca elektrodynamicznego oraz częstszym wpadaniem w poślizg zestawów kołowych podczas rozruchu w okresach jesienno-zimowych.

Na rysunku 3.36 przedstawiono przykładowe wady jakie zaobserwowano po dwuletniej eksploatacji pojazdów serii EN97. Na rysunkach 3.36 a) i b) ukazano nieliczne wady wykruszenia materiału powierzchni koła. Natomiast na rysunkach 3.36 c) i d) zaprezentowano przykłady zużycia ciernego pochodzącego od tarcia klocka hamulcowego o powierzchnię toczną. Na części szerokości koła obserwuje oddziaływanie klocka na koło po przyłożeniu sprawdzianu profilu koła UIC 28.



Rys. 3.36. Przykładowe widoki powierzchni tocznej kół pojazdu serii EN97 z wadą : a), b) wykruszeń, c), d) zużycia ciernego pochodzącego od klocka hamulcowego

Występowanie różnych wad podpowierzchniowych, powierzchniowych i zużycia ciernego od klocka hamulcowego było powodem zwiększenia głębokości skrawania podczas toczenia kół na tokarkach podtorowych lub do zestawów kołowych. W skrajnych przypadkach dochodziło do sytuacji (podczas piątego toczenia), że grubość warstwy skrawa wynosiła od 5 do nawet 18 mm.

3.3. Podsumowanie wyników badań rozpoznawczych zużycia kół pojazdu EN97

Przeprowadzone analizy zarejestrowanych parametrów geometrycznych kół podczas przeglądów *P2*, 14 pojazdów serii EN97 eksploatowanych w okresie dwóch lat od ich wyprodukowania, pozwoliły na uszeregowanie wszystkich parametrów profilu koła od najczęściej do najrzadziej przekraczanych. Przekroczenie danego parametru świadczyło o zużyciu koła zgodnie z wymaganiami zawartymi w dokumentacji systemu utrzymania i przyspieszało decyzję o przetoczeniu kół na tokarce do zestawów kołowych.

Z przeprowadzonych analiz na grupie tych samych pojazdów wynika, że:

- 1) Parametrami najczęściej przekraczanymi podczas przeglądu okresowego *P2* jest średnica koła D i stromość obrzeża qR . W przypadku średnicy koła stwierdzono 964 przypadki przekroczenia tego parametru, a w przypadku stromości obrzeża było to 744 przypadków na 7584 pomiarów. W ujęciu procentowym było to 43 i 33% wszystkich stwierdzonych przekroczonych parametrów. W przypadku średnicy kół, dominacja tego parametru wynikała zarówno z kontaktu koła z szyną (zużycie cierne) i zastosowanego hamulca klockowego [95, 97]. Jednak hamulec cierny nie jest hamulcem zasadniczym, tylko jest używany w ostatniej fazie hamowania hamulca elektrodynamicznego lub podczas hamowania awaryjnego.
- 2) Kolejnym parametrem, który przekroczony został w 11% wszystkich przekroczeń to grubość obrzeża, pozostałe parametry nie przekroczyły 5% przekroczeń poza granice tolerancji zawarte w dokumentacji systemu utrzymania.
- 3) Przekroczenie parametrów geometrycznych profilu koła jak i zestawu kołowego poza wymiary zawarte w DSU pojazdu stwierdzono najliczniej na drugim zestawie pierwszego wózka analizowanych pojazdów EN97. Dla średnicy koła D były to 94 przypadki przekroczenia (dla qR również 94 przypadki). Na drugim miejscu był pierwszy zestaw pierwszego wózka z 88 przypadkami dla parametru D i 83 przypadkami dla stromości obrzeża qR .

Na podstawie wyników zmierzonych średnic kół i obliczonych zużyć zarejestrowanych podczas przeglądu *P2* stwierdzono, że:

- 1) Zużycie kół w wózkach znajdujących się w tych samych miejscach w pierwszym trójczłonie *A* względem drugiego trójczłonu *B* jest wyraźnie i zauważalnie większe np. zużycie w zestawie Z1A (koło lewe i prawe pierwszego wózka napędnego) jest większe względem zestawu Z1B (koło również lewe i prawe pierwszego wózka napędnego).
- 2) Zużycie kół na wózkach środkowych tocznych było najmniejsze względem pozostałych (pierwszego i ostatniego) wózków napędnych, co stwierdzono zarówno w trójczłonie *A* i *B* analizowanych pojazdów EN97.
- 3) Zużycie kół na średnicy tocznej było większe w okresach jesienno-zimowych względem okresów wiosenno-letnich, co szczególnie jest zauważalne na wykresach zmiany średnicy kół w funkcji przebiegu lub czasu eksploatacji.
- 4) Przetoczenia kół na tokarce do zestawów kołowych podczas kolejnych przeglądów okresowych *P2* były większe względem wcześniejszych okresów. Wzrost grubości warstwy skrawanej wynikał też z faktu odsłaniania wad podpowierzchniowych, występowania wad powierzchniowych na kole w styku z szyną oraz nadmiernego używania hamulca klockowego PN.

4. BADANIA ROZPOZNAWCZE ZUŻYCIA KÓŁ I TARCZ HAMULCOWYCH POJAZDU EN76

4.1. Geneza badań

Analizując wyniki badań rozpoznawczych w zakresie zużycia kół pojazdów serii EN97 stwierdzono, że najczęściej przekraczаныmi parametrami profilu koła, co było stwierdzane podczas przeglądów okresowych to średnica koła D i stromość obrzeża qR . W ujęciu procentowym było to 43 i 33% wszystkich stwierdzonych przekroczonych parametrów. Badania również pozwoliły na ocenę zużycia zestawów kołowych w zależności od ich lokalizacji w wózkach, zarówno tocznych i napędnych. W przypadku pierwszego wózka napędnego we wszystkich przypadkach analizowanych pojazdów, drugi zestaw kołowy odznaczał się większym zużyciem względem pierwszego zestawu kołowego. Również taka sytuacja miała miejsce na drugim trójczłonie pojazdu mimo, że w większości przypadków najczęściej to pierwsze zestawy kołowe w wózku cechowały się największym zużyciem, w szczególności w zakresie obrzeża koła. Przyczyny większego zużycia na drugim zestawie względem pierwszego można próbować wyjaśnić kwestiami związanymi z konstrukcją wózka, jego podatności względem nadwozia w czasie wpisywania się w łuk, układu osi pojazdów czy profilem linii kolejowej. Badania również dostarczyły informacji o zmiennej intensywności zużycia kół w zależności od pory roku, gdzie w okresie jesienno-zimowym zużycia kół były większe względem okresu wiosenno-letniego. Dodatkowo w czasie analiz stwierdzono, że kolejne przetoczenia zestawów kołowych w celu odtworzenia profilu koła na zarys zgodny z PN-EN [89] były większe względem poprzednich przetoczeń, przez co toczenia odbywały się na większej głębokości od 5 do nawet 15 mm, w zależności od zestawu kołowego w wózku. W badaniach rozpoznawczych w zakresie zmiany średnicy kół w okresie dwóch pierwszych lat eksploatacji pojazdów serii EN97 przeprowadzono na pojeździe z klasycznym posadowieniem nadwozia (pudeł) na wózkach tocznych i napędnych za pośrednictwem czopów skrętu. Pojazdy EN97 skonstruowane były jako dwa trójczłony o układzie osi (Bo'2'Bo')+(Bo'2'Bo') połączone sprzęgiem rozłącznym na czas prac naprawczych, a na wzrost intensywności zużycia kół w zakresie średnicy kół D miało dodatkowe hamowanie hamulcem ciernym ze wstawkami spiekanyymi mimo, że hamowanie zasadnicze odbywało się hamulcem elektrodynamicznym. Podjęcie dalszego działania związanego z oceną zużycia i zmniejszeniem średnicy kół zestawów kołowych wynika z faktu, że wielocłonowe elektryczne czy spalinowe zespoły trakcyjne budowane są w różnej konfiguracji w zakresie liczby członów czy oparcia nadwozia o wózki. Dodatkowo cechą odróżniająca pojazdy jest występowanie zestawów kołowych z hamulcem klockowym działającym na powierzchnie toczną kół jak również kół zabudowanych z dwóch stron tarczami hamulcowymi (rozwiązanie przeważające) lub tarczami mocowanymi na osi zestawów kołowych (cecha konstrukcyjna stosowana w wagonach pasażerskich). Cechą wspólną w zespołach trakcyjnych jest zastosowanie skrajnych wózków jako napędowe [75]. Różnorodność w cechach konstrukcyjnych zespołów trakcyjnych związanych z liczbą członów, typów i parametrów wózków, posadowienia nadwozia względem wózków, parametrów geometrycznych zestawów kołowych, profilu (zarysu) kół czy rodzaju hamulca ciernego sprawia, że procesy zużycia wynikające z toczenia i prowadzenia zestawu kołowego w torze kolejowym mogą być inne dla każdego pojazdu. Mimo przeprowadzenia badań rozpoznawczych w zakresie zużycia profilu kół na pojeździe serii EN97 z klasycznym połączeniem nadwozia z wózkami, autor postanowił przeprowadzić kolejne badania na pojeździe wielocłonowym z oparcie nadwozia na wózkach wspólnych systemu Jakobsa jak i na wózkach klasycznych [77, 95, 96] z zestawami kołowymi z zamocowanymi tarczami hamulcowymi na kołach.

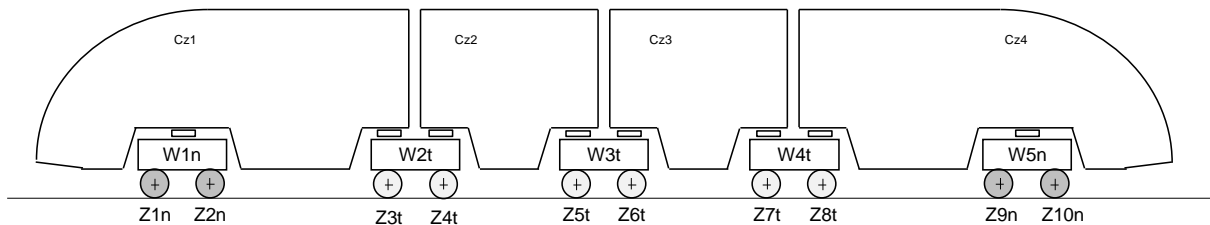
4.2. Obiekt badań

Obiektem badań były elektryczne zespoły trakcyjne EN76 ELF (rys. 4.1) wyprodukowane przez fabrykę Pojazdów Szynowych PESA w Bydgoszczy. Nazwa ELF jest skrótem z języka angielskiego wyrazów electric low floor jako pojazd elektryczny niskopodłogowy. Premiera pojazdu miała miejsce na Międzynarodowych Targach Kolejowych Innotrans w Berlinie w 2010 roku [106].



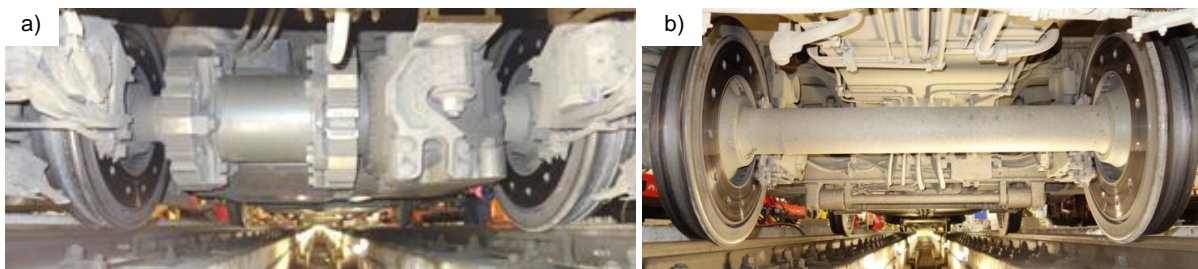
Rys. 4.1. Widok pojazdu 22WE (EN76) podczas wyjazdu ze stacji Poznań Główny [fot. A.M. Rilo Cañas]

Elektryczne zespoły trakcyjne PESA Elf zostały zaprojektowane do różnych celów. W zależności od zasięgu ich kursowania pojazdy wykorzystywane są w ruchu aglomeracyjnym, regionalnym i międzyregionalnym [107, 109]. Pojazdy w podstawowych wersjach zasilane są napięciem 3kV prądu stałego i przeznaczone są na tor o rozstawie 1435 mm. Wszystkie pojazdy, niezależnie od typu mogą poruszać się z prędkością 160 km/h. Układ osi badanych pojazdów to Bo'2'2'2'Bo. Człony połączone są ze sobą przez system wózków tocznych Jakobsa, natomiast skrajne człony dodatkowo podparte są na wózkach napędowych [12, 13].



Rys. 4.2. Schemat pojazdu EN76 (22WE): Cz1, Cz4 - Człon napędowy z kabiną sterowniczą, Cz2, Cz3 - Człon środkowy toczny, W1n, W5n - Wózki napędne, W2t, W3t, W4t - Wózki toczne

Układ osi elektrycznego zespołu trakcyjnego EN76 przedstawia rysunek 4.2. Na rysunku 4.3 przedstawiono widok zestawów kołowych z tarczami hamulcowymi zamocowanymi na kołach.



Rys. 4.3 Widok zestawów kołowych pojazdu 22WE: a) napędny na wózku 26MnF, b) toczny na wózku 40ANf [fot. A.M. Rilo Cañas]

Pojazd ze względu na obniżoną podłogę na dużej części [108], wyposażony jest w hamulec tarczowy z tarczami zamocowanymi na kołach w celu uniknięcia zbędnej zabudowy w części środkowej wózka mechanizmem dźwigniowym. W przypadku wózków napędnych tarcze mocowane na kołach wymuszały rozmiar silników trakcyjnych z przekładnią. Podstawowe parametry techniczne pojazdu PESA Elf EN76 przedstawiono w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Podstawowe dane techniczne pojazdu EN76 [13]

Lp.	Nazwa	Wartość	Jednostka
1	Szerokość toru	1435	mm
2	Całkowita długość zespołu ze zderzakami	75 250	mm 60 000
3	Największa szerokość zespołu	2 883	mm 2 850
4	Największa wysokość zespołu od główki szyny	4 280	mm 4 452
5	Rozstaw czopów skrzętu	4×16 300	mm 11 750
6	Moc zespołu trakcyjnego	4×500	kW 1440
7	Napięcie obwodów głównych	3kV DC	kV
8	Maksymalna prędkość eksploatacyjna	160	km/h 80
9	Przyspieszenie do 40 km/h	1,0	m/s ²
10	Opóźnienie hamowania	1,2	m/s ²
11	Masa służbowa	134,5	t 101,5
12	Średnica toczna kół (nowych/zużytych)	850/780	mm/mm

Porównując tabelę 4.1 dla pojazdu EN76 Elf względem pojazdu EN97 opisanego w rozdziale 3 (tabela 3.1) dla którego przeprowadzono pierwsze badania rozpoznawcze w zakresie zużycia kół, można zauważyć, że wartości podstawowych danych technicznych są znacząco różne. Stąd zdecydowano o przeprowadzeniu kolejnych badań rozpoznawczych w celu obserwacji zjawiska zużycia kół na średnicy koła oraz zużycia tarcz hamulcowych.

4.3. Metodyka badań

Do oceny zużycia zestawów kołowych z zamocowanymi tarczami hamulcowymi do kół wybrano 4 pojazdy typu EN76. Pojazdy w 2012 roku w różnych miesiącach przekazywane były przewoźnikowi jako nowe od producenta Pesa S.A. Badania prowadzono przez okres około 5 lat do pierwszego przeglądu poziomu *P4* tj. naprawy rewizyjnej. Podczas badań rejestrowano takie parametry geometryczne zestawu kołowego jak średnica koła *D* i grubość tarcz hamulcowych *T*. Nie analizowano i nie oceniano pozostałych parametrów profilu koła gdyż średnica koła *D* była najczęściej przekraczającym parametrem stwierdzanym podczas przeglądu *P2* względem pozostałych. Należy zaznaczyć, że analizowane pojazdy Pesa Elf EN76 kursowały na terenie nizinnym, ze znikomą liczbą małych promieni (poniżej 300 m, z wyjątkiem rozjazdów), co nie intensyfikowało zużycia w okolicy obrzeża kół. Trasy jakie realizowały badane pojazdy od początku prowadzenia ruchu planowego u przewoźnika przedstawiono w tabeli 4.2.

Tab. 4.2. Trasy realizowane przez badane pojazdy serii EN76 [110]

Lp.	Nr linii	Stacja początkowa i końcowa	Długość linii w km
1	3	Poznań Główny – Zbąszynek	81
2	353	Poznań Główny – Gniezno – Mogilno	80
3	3	Poznań Główny – Konin – Kłodowa – Kutno	179

Pojazdy kursowały zamiennie na jednej z trzech tras. Dodatkowo, w celu wyrównania intensywności zużycia obrzeży kół, pojazdy po przeglądach *P2* były obracane kabinami względem kierunku jazdy. Badania zużycia kół zestawów kołowych pojazdów serii EN76 przeprowadzone były na podstawie analizy wyników parametrów geometrycznych zestawów

kołowych zapisywanych podczas przeglądu P2 zgodnie z cyklem przeglądowo naprawczym zawartym w dokumentacji systemu utrzymania. Dla pojazdów EN76 cykle przeglądów i napraw przedstawiono w tabeli 4.3.

Tab. 4.3. Cykle przeglądów i napraw elektrycznego zespołu trakcyjnego EN76 [13]

Lp.	Poziom utrzymania	Maksymalny przebieg w km	Maksymalny czas
1	P1	–	co 9 dni ± 1 dzień
2	P2	–	co 2 m-c ± 5 dni
3	P3*	co 200 000 km ± 5%	co 12 m-c ± 10 dni
4	P4*	co 1000 000 km	5 lat
5	P5*	co 3 000 000 km	15 lat

* w zależności co wystąpi pierwsze.

W tabeli 4.4 przedstawiono dla badanych pojazdów przebiegi i czas eksploatacji od chwili rozpoczęcia regularnych przewozów po przekazaniu pojazdów od producenta.

Tab. 4.4. Dane o czasie eksploatacji badanych pojazdów EN76

Numer pojazdu	Data rozpoczęcia jazdy	Czas eksploatacji	Przebieg
026	08.08.2012 r.	5 lat 7 miesięcy 22 dni	614 916 km
028	18.10.2012 r.	5 lata 5 miesięcy 12 dni	627 807 km
030	21.12.2012 r.	5 lat 3 miesiące 9 dni	612 364 km
031	18.03.2013 r.	5 lat 12 dni	591 988 km

Średni przebieg analizowanych w zakresie zużycia kół elektrycznych zespołów trakcyjnych pojazdów EN76 do przeglądu P4 wyniósł 611 768,75 km. W odniesieniu do tabeli 4.3, pojazdy serii EN76 nie osiągały przebiegu 1 miliona kilometrów w okresie 5 lat. Zestawy kołowe cechowały się dużym zapasem wymiarowym. Właściciel pojazdów zdecydował o zmianie zapisu w DSU o wydłużeniu do 6 lat wykonanie naprawy P4.

4.3.1. Wyniki badań średnicy kół i grubości tarcza hamulcowych

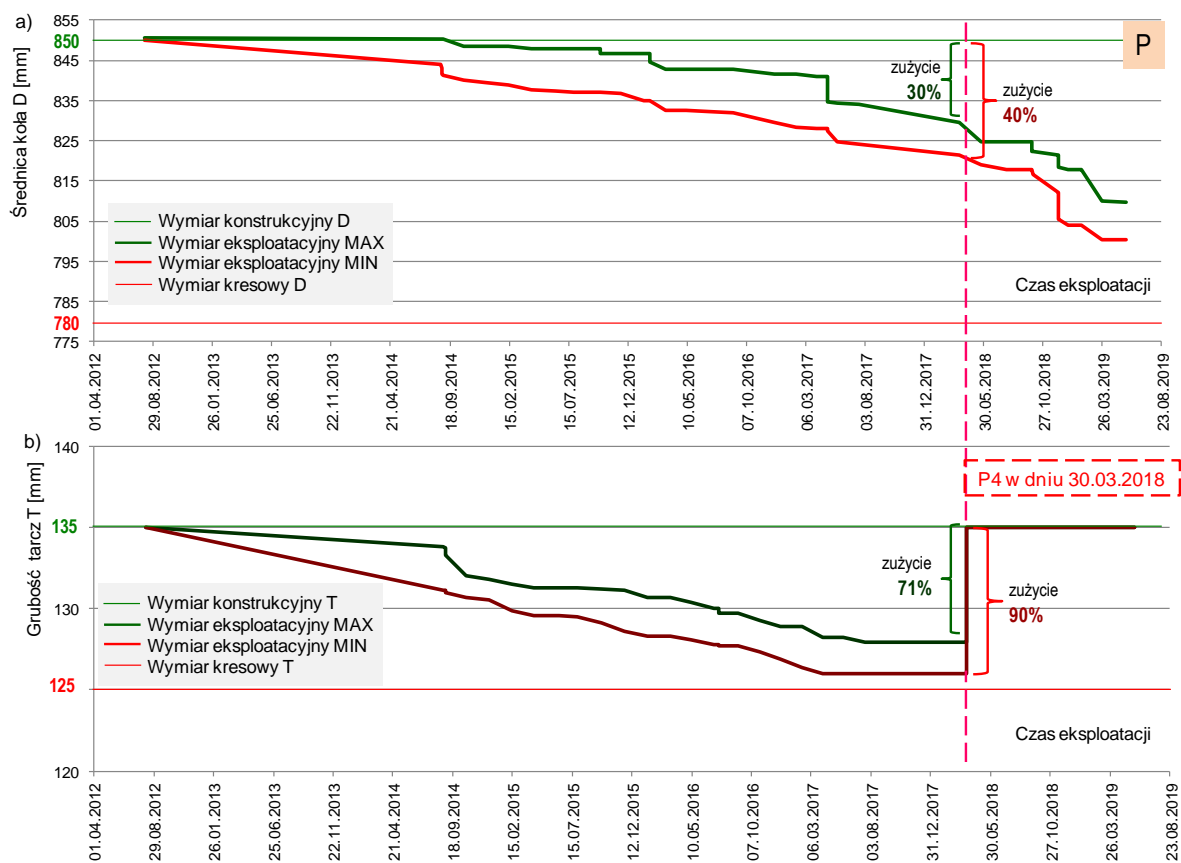
Podczas badań szczególną uwagę zwrócono na wymiar średnicy koła D oraz grubość tarczy T . W tabeli 4.5 przedstawiono widok uproszczonej względem [12] i przygotowanej do badań karty pomiarów dwóch parametrów zestawów kołowych w trakcie eksploatacji wraz z wynikami. W karcie przedstawiono przykładowe wyniki zarejestrowane podczas przeglądu P2 dla pierwszego analizowanego pojazdu z zaznaczonymi wymiarami max i min dla D i T .

Tab. 4.5. Przykładowa karta pomiarów parametru D oraz T z przeglądu P2 dla pojazdu EN76 o numerach 026

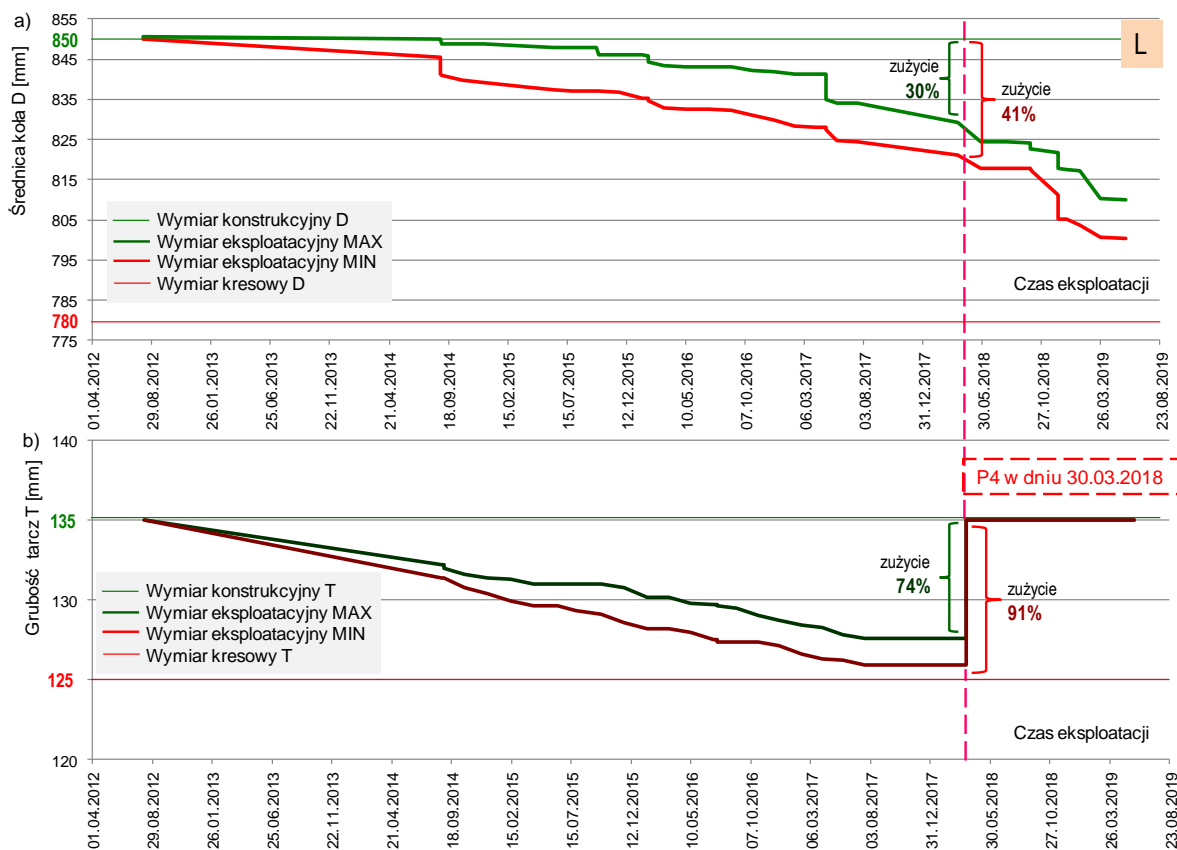
Numer zestawu koł.	Średnica koła D w [mm]		Grubość tarczy T w [mm]	
	L	P	L	P
1	839,1	838,9	130,9	130,9
2	839,5	839,6	130,9	131,1
3	847,1	846,6	130,4	129,7
4	847,5	847,1	130,0	130,1
5	847,9	847,8	130,9	130,2
6	846,6	846,2	130,4	130,3
7	847,3	847,5	<u>129,3</u>	<u>129,5</u>
8	848,0	847,7	130,4	130,7
9	837,3	837,6	130,4	131,3
10	<u>837,1</u>	<u>837,2</u>	131,0	130,9

L – Koło (tarcza) lewa, P – Koło (tarcza) prawa,
 Pogrubienie np. **848,0** wskazuje na wymiar maksymalny dla tarczy i koła,
 Podkreślenie np. 837,1 to wymiar minimalny.

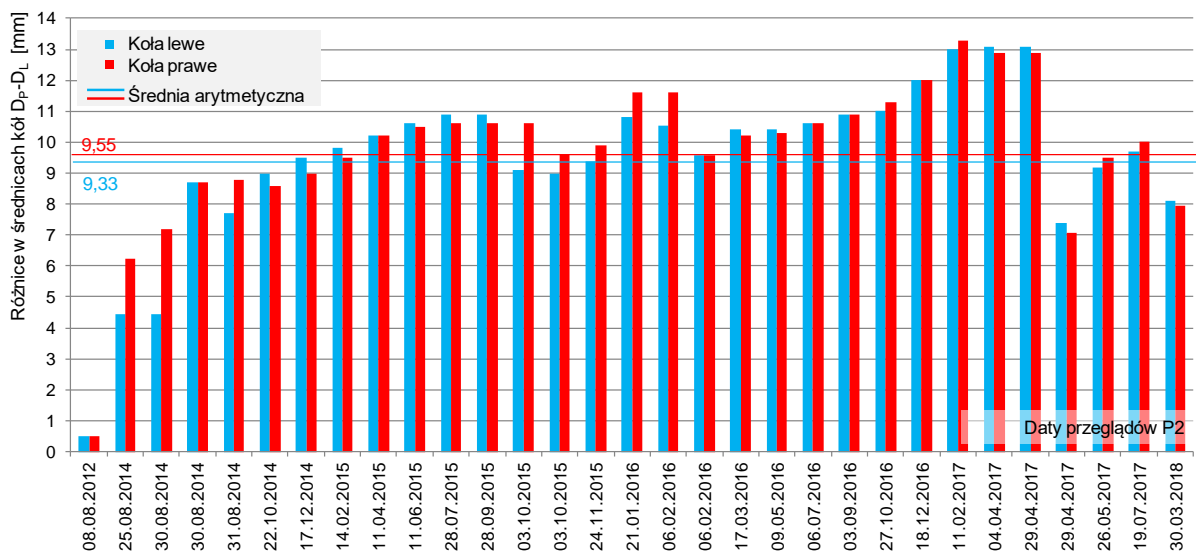
W pierwszej kolejności dla wszystkich zestawów kołowych z karty pomiarów parametrów D i T wybierano wymiar maksymalny i minimalny średnicy koła i grubości tarczy do dalszych analiz. Obserwację średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych prowadzono do naprawy rewizyjnej. Pierwszym celem badań było wyznaczenie charakterystyk wymiaru maksymalnego i minimalnego średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych. Na rysunkach 4.4 i 4.5 przedstawiono graficznie zależność wymiaru maksymalnego i minimalnego zarejestrowanego na wszystkich 10 zestawach kołowych w zakresie średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych w funkcji czasu eksploatacji.



Rys. 4.4. Zależność: a) średnicy koła w okręgu tocznym, b) grubości tarczy hamulcowej od czasu eksploatacji, zaobserwowana podczas przeglądów $P2$ aż do przeglądu $P4$ dla strony prawej



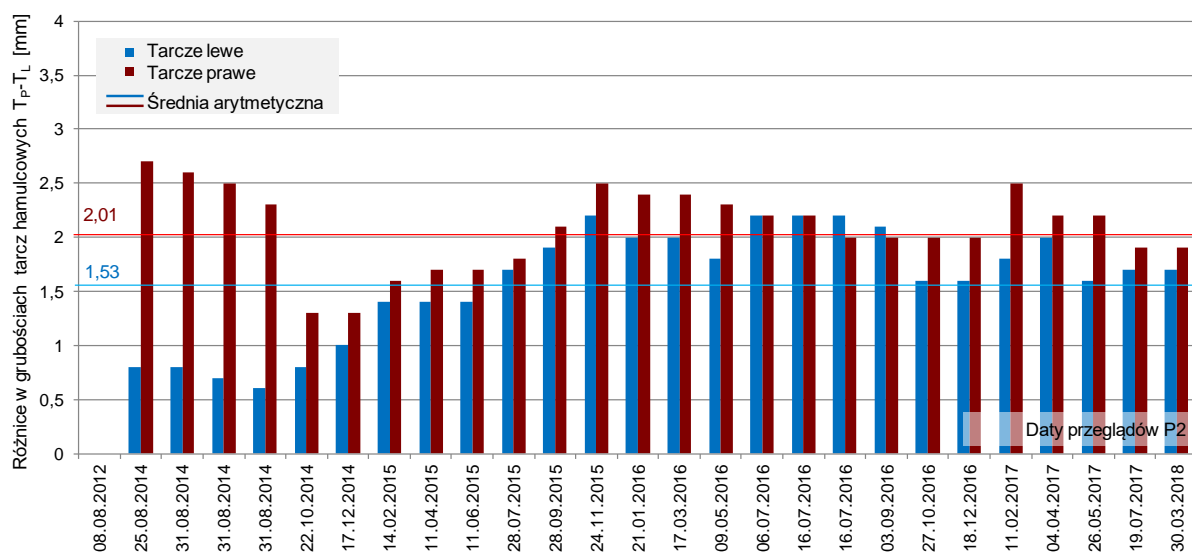
Rys. 4.5. Zależność: a) średnicy koła w okręgu tocznym, b) grubości tarczy hamulcowej od czasu eksploatacji, zaobserwowana podczas przeglądów P2 aż do przeglądu P4 dla strony lewej



Rys. 4.6. Zależność różnicy średnic kół w okręgu tocznym od czasu eksploatacji, zaobserwowana podczas przeglądów P2 aż do przeglądu P4

Dodatkowo na rysunku 4.6 przedstawiono różnice w wymiarach maksymalnych i minimalnych średnic kół ($D_P - D_L$) prawych względem lewych jakie stwierdzono na wszystkich zestawach kołowych w czasie przeglądów P2, aż do naprawy rewizyjnej P4 po 5 latach eksploatacji. Natomiast na rysunku 4.8 przedstawiono różnice w wymiarach maksymalnych i minimalnych grubości tarcz hamulcowych ($T_P - T_L$) prawych względem lewych jakie również stwierdzono na wszystkich zestawach kołowych w czasie przeglądów

P2. Ostatnia data na wykresach 4.6 i 4.7 tj. 30.03.2018 r. jest ostatnim przeglądem P2 i skierowaniem pojazdu na przegląd P4.



Rys. 4.7. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu eksploatacji, zaobserwowana podczas przeglądów P2 aż do przeglądu P4

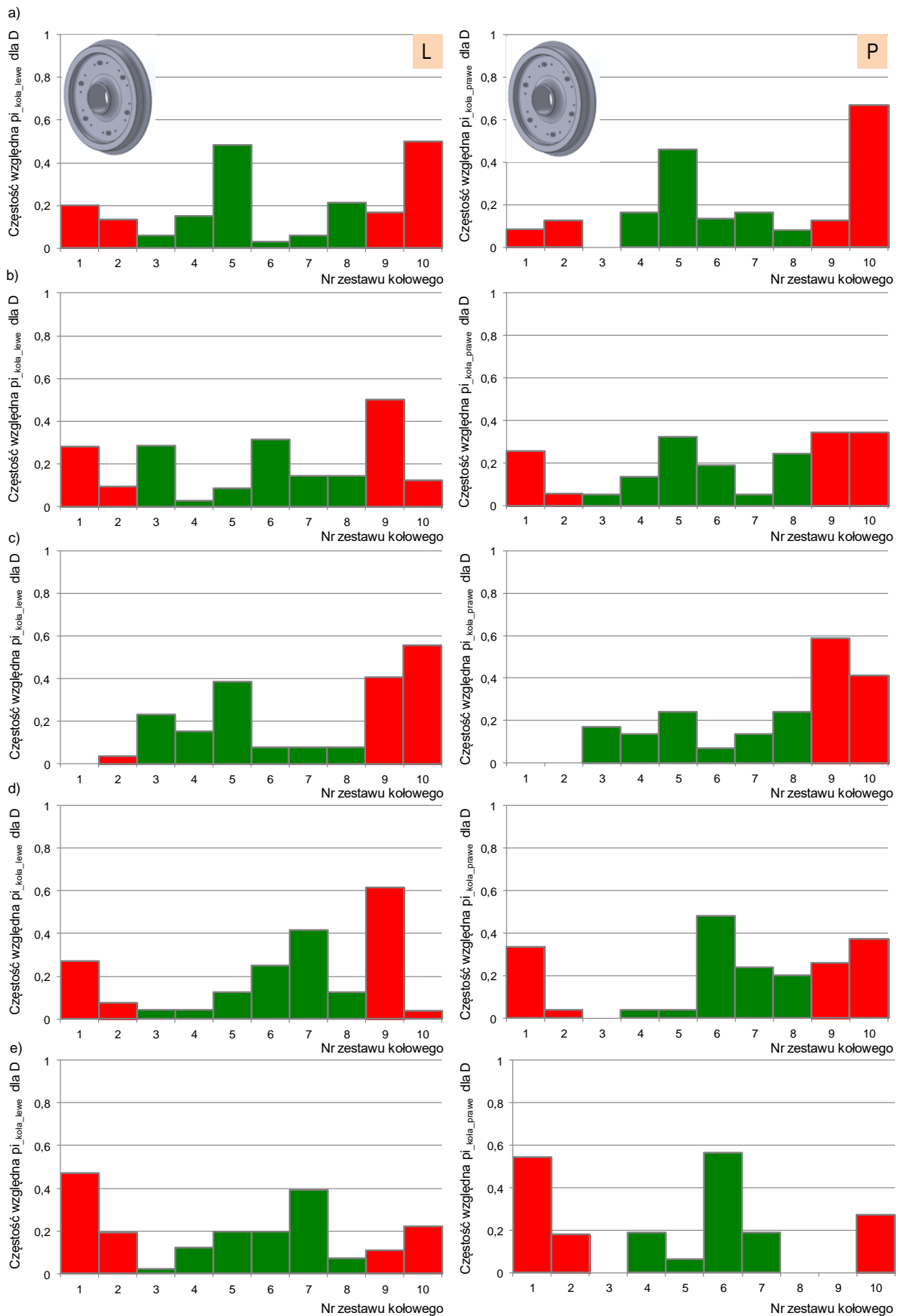
Analizując dane przedstawione na rysunkach 4.5-4.8 stwierdza się, że od pierwszych przeglądów okresowych obserwuje się różnice zarówno w średnicach kół jak i grubościach tarcz hamulcowych. W przypadku średnic kół różnice między wymiarem maksymalnym a minimalnym osiągają w skrajnych przypadkach wartości 13,1 mm dla kół lewych i 13,3 mm dla kół prawych, przy średnich wartościach odnoszących się do okresu 5 lat, wynoszących 9,55 i 9,33 mm, co również przedstawiono na rysunku 5.7. Zgodnie z dokumentacją systemu utrzymania pojazdu EN76 [13] różnica w średnicy zestawów kołowych nie może przekroczyć 15 mm w przypadku wózków znajdujących się w kolejnych członach pojazdu, 5 mm w przypadku jednego wózka i nie może przekroczyć 1 mm względem koła prawego i lewego tego samego zestawu kołowego. W przypadku grubości tarcz hamulcowych maksymalne różnice wyniosły 2,2 mm dla strony lewej i 2,7 mm dla strony prawej, przy wartościach średnich 1,53 mm dla strony lewej i 2,01 mm dla strony prawej.

Drugim celem tych badań było wyznaczenie na podstawie zebranych danych z pomiarów średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych na wszystkich przeglądach okresowych poziomu P2 od chwili czasowej rozpoczęcia jazd planowych do pierwszego przeglądu poziomu P4 – rozkładu zestawów kołowych z wymiarem maksymalnym i minimalnym parametru D i T . Wspomniane rozkłady sporządzono jako histogramy liczebności skumulowanej średnicy koła D i grubości tarczy hamulcowej T dla wszystkich zestawów kołowych analizowanych pojazdów EN76. Na tej podstawie określony został ranking zestawów kołowych w których stwierdzony wymiar maksymalny średnicy koła świadczący o najmniejszym zużyciu jak i wymiar minimalny (największe zużycie kół) był najczęściej stwierdzane podczas przeglądów P2. Podobnie dotyczy to grubości tarcz w zakresie wymiaru maksymalnego i minimalnego stwierdzanego podczas P2. W tabeli 4.6 na podstawie zebranych danych w zakresie wartości maksymalnej i minimalnej średnicy kół stwierdzanych podczas przeglądów okresowych poziomu P2 wyznaczono dla wszystkich analizowanych pojazdów zgodnie z [40] liczebności li występowania danego wymiaru max i min oraz częstości względne pi . Na rysunku 4.8 przedstawiono graficznie częstość występowania wymiaru maksymalnego i minimalnego wymiaru średnicy kół na wszystkich zestawach kołowych. Kolorem czerwonym zaznaczono wymiar minimalny, a kolorem zielonym wymiar maksymalny średnicy D zestawu kołowego.

Natomiast w tabeli 4.7 oraz na rysunku 4.9 przedstawiono liczebności i częstości względne występowania wymiaru *max* i *min* dla grubości tarcz hamulcowych *T*.

Tab. 4.6. Liczebności i częstości dla wymiaru maksymalnego i minimalnego średnicy kół zestawów kołowych pierwszych trzech analizowanych pojazdów EN76

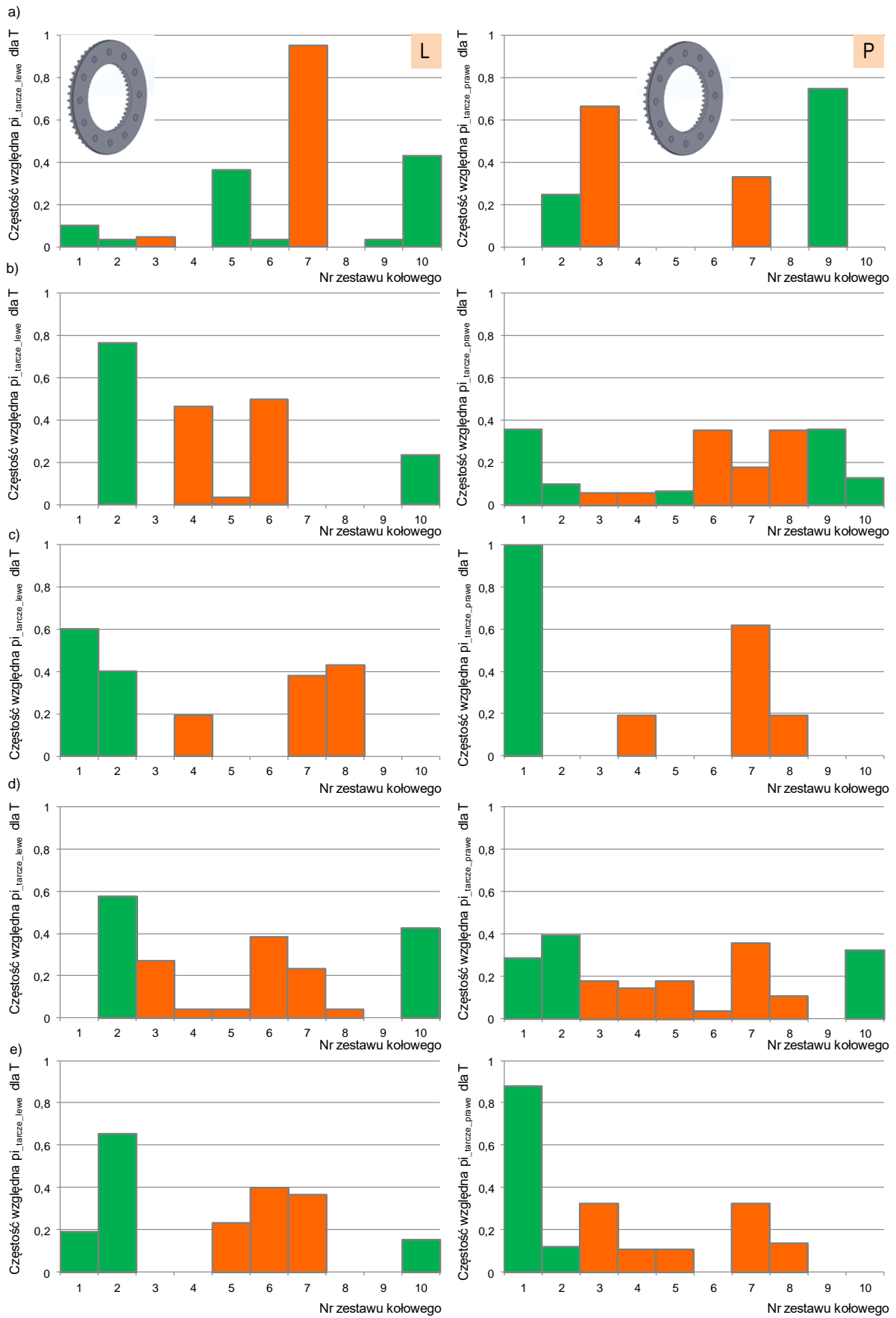
Pojazd 026		Liczba przeglądów P2: n=36						
Nr ZK	Koła lewe				Koła prawe			
	Liczebność li_{max} dla D	Częstość pi_{max} dla D	Liczebność li_{min} dla D	Częstość pi_{min} dla D	Liczebność li_{max} dla D	Częstość pi_{max} dla D	Liczebność li_{min} dla D	Częstość pi_{min} dla D
1	0	0	6	0,200	0	0	2	0,083
2	0	0	4	0,133	0	0	3	0,125
3	2	0,061	0	0	0	0	0	0
4	5	0,152	0	0	6	0,162	0	0
5	16	0,485	0	0	17	0,459	0	0
6	1	0,030	0	0	5	0,135	0	0
7	2	0,061	0	0	6	0,162	0	0
8	7	0,212	0	0	3	0,081	0	0
9	0	0	5	0,167	0	0	3	0,125
10	0	0	15	0,500	0	0	16	0,667
Σ	33	1	30	1	37	1	24	1
Pojazd 028		Liczba przeglądów P2: n=35						
Nr ZK	Koła lewe				Koła prawe			
	Liczebność li_{max} dla D	Częstość pi_{max} dla D	Liczebność li_{min} dla D	Częstość pi_{min} dla D	Liczebność li_{max} dla D	Częstość pi_{max} dla D	Liczebność li_{min} dla D	Częstość pi_{min} dla D
1	0	0	9	0,281	0	0	9	0,257
2	0	0	3	0,094	0	0	2	0,057
3	10	0,286	0	0	2	0,054	0	0
4	1	0,029	0	0	5	0,135	0	0
5	3	0,086	0	0	12	0,324	0	0
6	11	0,314	0	0	7	0,189	0	0
7	5	0,143	0	0	2	0,054	0	0
8	5	0,143	0	0	9	0,243	0	0
9	0	0	16	0,500	0	0	12	0,343
10	0	0	4	0,125	0	0	12	0,343
Σ	35	1	32	1	37	1	35	1
Pojazd 030		Liczba przeglądów P2: n=33						
Nr ZK	Koła lewe				Koła prawe			
	Liczebność li_{max} dla D	Częstość pi_{max} dla D	Liczebność li_{min} dla D	Częstość pi_{min} dla D	Liczebność li_{max} dla D	Częstość pi_{max} dla D	Liczebność li_{min} dla D	Częstość pi_{min} dla D
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0,037	0	0	0	0
3	6	0,231	0	0	5	0,172	0	0
4	4	0,154	0	0	4	0,138	0	0
5	10	0,385	0	0	7	0,241	0	0
6	2	0,077	0	0	2	0,069	0	0
7	2	0,077	0	0	4	0,138	0	0
8	2	0,077	0	0	7	0,241	0	0
9	0	0	11	0,407	0	0	17	0,586
10	0	0	15	0,556	0	0	12	0,414
Σ	26	1	27	1	29	1	29	1



Rys. 4.8. Rozkład częstości względnej wstępowania wymiaru maksymalnego (kolor zielony) i minimalnego (kolor czerwony) średnicy kół D zestawów kołowych podczas przeglądów $P2$ dla pojazdu EN76 o numerze: a) 026, b) 028, c) 030, d) 031 i e) 036

Tab. 4.7. Liczebności i częstości dla wymiaru maksymalnego i minimalnego grubości tarcz hamulcowych zestawów kołowych wybranych trzech analizowanych pojazdów EN76

Pojazd 028		Liczba przeglądów P2: n=35						
Nr ZK	Tarcze hamulcowe lewe				Tarcze hamulcowe prawe			
	Liczebność li _{max} dla T	Częstość pi _{max} dla T	Liczebność li _{min} dla T	Częstość pi _{min} dla T	Liczebność li _{max} dla T	Częstość pi _{max} dla T	Liczebność li _{min} dla T	Częstość pi _{min} dla T
1	0	0	0	0	11	0,355	0	0
2	23	0,767	0	0	3	0,097	0	0
3	0	0	0	0	0	0	2	0,059
4	0	0	13	0,464	0	0	2	0,059
5	0	0	1	0,036	2	0,065	0	0
6	0	0	14	0,5	0	0	12	0,353
7	0	0	0	0	0	0	6	0,176
8	0	0	0	0	0	0	12	0,353
9	0	0	0	0	11	0,355	0	0
10	7	0,233	0	0	4	0,129	0	0
Σ	30	1	28	1	31	1	34	1
Pojazd 031		Liczba przeglądów P2: n=30						
Nr ZK	Tarcze hamulcowe lewe				Tarcze hamulcowe prawe			
	Liczebność li _{max} dla T	Częstość pi _{max} dla T	Liczebność li _{min} dla T	Częstość pi _{min} dla T	Liczebność li _{max} dla T	Częstość pi _{max} dla T	Liczebność li _{min} dla T	Częstość pi _{min} dla T
1	0	0	0	0	8	0,286	0	0
2	15	0,577	0	0	11	0,393	0	0
3	0	0	7	0,269	0	0	5	0,179
4	0	0	1	0,038	0	0	4	0,143
5	0	0	1	0,038	0	0	5	0,179
6	0	0	10	0,385	0	0	1	0,036
7	0	0	6	0,231	0	0	10	0,357
8	0	0	1	0,038	0	0	3	0,107
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	11	0,423	0	0	9	0,321	0	0
Σ	26	1	21	1	28	1	21	1
Pojazd 036		Liczba przeglądów P2: n=36						
Nr ZK	Tarcze hamulcowe lewe				Tarcze hamulcowe prawe			
	Liczebność li _{max} dla T	Częstość pi _{max} dla T	Liczebność li _{min} dla T	Częstość pi _{min} dla T	Liczebność li _{max} dla T	Częstość pi _{max} dla T	Liczebność li _{min} dla T	Częstość pi _{min} dla T
1	5	0,192	0	0	22	0,880	0	0
2	17	0,654	0	0	3	0,120	0	0
3	0	0	0	0	0	0	12	0,324
4	0	0	0	0	0	0	4	0,108
5	0	0	7	0,233	0	0	4	0,108
6	0	0	12	0,400	0	0	0	0
7	0	0	11	0,367	0	0	12	0,324
8	0	0	0	0	0	0	5	0,135
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	4	0,154	0	0	0	0	0	0
Σ	26	1	27	1	25	1	37	1



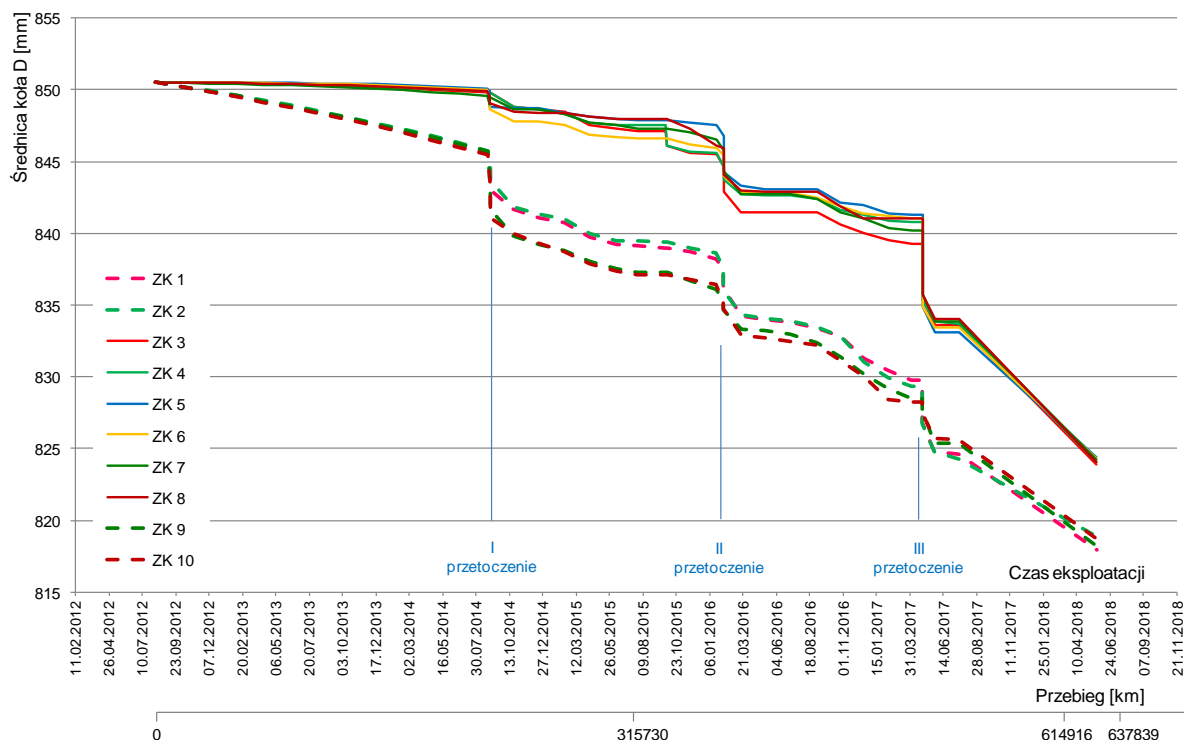
Rys. 4.9. Rozkład częstości względnej wstępowania wymiaru maksymalnego (kolor jasno zielony) i minimalnego (kolor pomarańczowy) grubości tarcz hamulcowych zestawów kołowych podczas przeglądów P2 dla pojazdu EN76 o numerze: a) 026, b) 028, c) 030, d) 031 i e) 036

Analizując wyniki zawarte w tabeli 4.6 oraz w sposób graficzny na rysunku 4.8 w zakresie liczebności i częstości występowania wymiaru maksymalnego i minimalnego średnicy kół podczas przeglądu poziomu *P2* stwierdzono, że w każdym przypadku zestawy napędne (pierwszy i ostatni wózek) wykazywały się największym zużyciem. Stwierdzono to, gdyż podczas każdego przeglądu *P2* zestawy kołowe 1, 2, 9 i 10 wykazywały najmniejsze średnice kół. Zestawy toczne (2, 3 i 4 wózek) cechowały się najniższym zużyciem gdyż podczas przeglądów posiadały największe średnice względem zestawów napędnych. Brak danych na wykresie częstości względnej oznacza, że dany zestaw kołowy podczas pomiaru średnicy koła nigdy nie osiągnął wymiary maksymalnego oraz minimalnego podczas okresowych przeglądów *P2* co dwa miesiące. Należy podkreślić, że analizowane pojazdy mimo zamiennego kursowania na trzech trasach zgodnie z tabelą 4.2 (jazdy tam i z powrotem przez zmianę kabiny przez maszynistę), nie wykazały zbliżonych zużyć na zestawach pierwszego i ostatniego wózka. Wspomniane zużycie definiowane jest w sposób pośredni na podstawie liczby stwierdzonych przypadków najniższej średnicy koła *D* podczas przeglądów okresowych. Również podczas tych analiz stwierdzono, że nie w każdym przypadku zestawy skrajne (pierwszy i ostatni) posiadały największe zużycia. W dwóch pojazdach zestaw nr 9 miał większe zużycia względem ostatniego zestawu nr 10, co również stwierdzono w przypadku analizy zużycia zestawów kołowych na pojazdach EN97 przedstawionych w rozdziale 3.

W przypadku grubości tarcz hamulcowych ocenianych w czasie przeglądów okresowych poziomu *P2* w zakresie wymiaru maksymalnego i minimalnego, analizując wyniki liczebności i częstości względnej wymiaru *max* i *min* co zawarto w tabeli 4.7 oraz na rysunku 4.9 stwierdzono, że tendencja w zużyciu jest odwrotna jak miało to miejsce w przypadku średnicy *D* kół zestawów kołowych. W przypadku kół wymiar minimalny stwierdzany był podczas wszystkich przeglądów *P2* na zestawach napędnych (skrajne wózki pojazdów EN76). Natomiast w odniesieniu do tarcz hamulcowych wymiar minimalny grubości tarcz stwierdzany był na tocznych wózkach między pierwszym i ostatnim wózkiem napędnym. Wózki skrajne natomiast cechowały się maksymalnymi wymiarami grubości tarcz hamulcowych, co stwierdzano w każdym przypadku przeglądu okresowego *P2*. Dla przykładu zestawy toczne nr 5 i 6 oraz nr 7 i 8 (wózki toczne) wykazywały najmniejsze zużycie na średnicy kół (maksymalne wymiary średnic) ale największe zużycie tarcz hamulcowych (minimalne grubości tarcz). Taką tendencję należy wyjaśnić specyfiką wózka napędowego, który ze względu na swoją lokalizację i poślizgi zestawów kołowych przy rozruchu powodował większe zużycie na średnicy koła względem zestawów tocznych, natomiast silnik trakcyjny w czasie hamowania elektrodynamicznego pracował w trybie prądnicowym generując znaczny moment hamujący. Przez co hamulec cierny włączany był w krótkim czasie (w ostatniej fazie hamowania) lub w czasie hamowania nagłego, co zmniejszało zużycie cierne tarcz hamulcowych.

4.3.2. Wyniki badań zużycia kół i tarcz hamulcowych pojazdu EN76

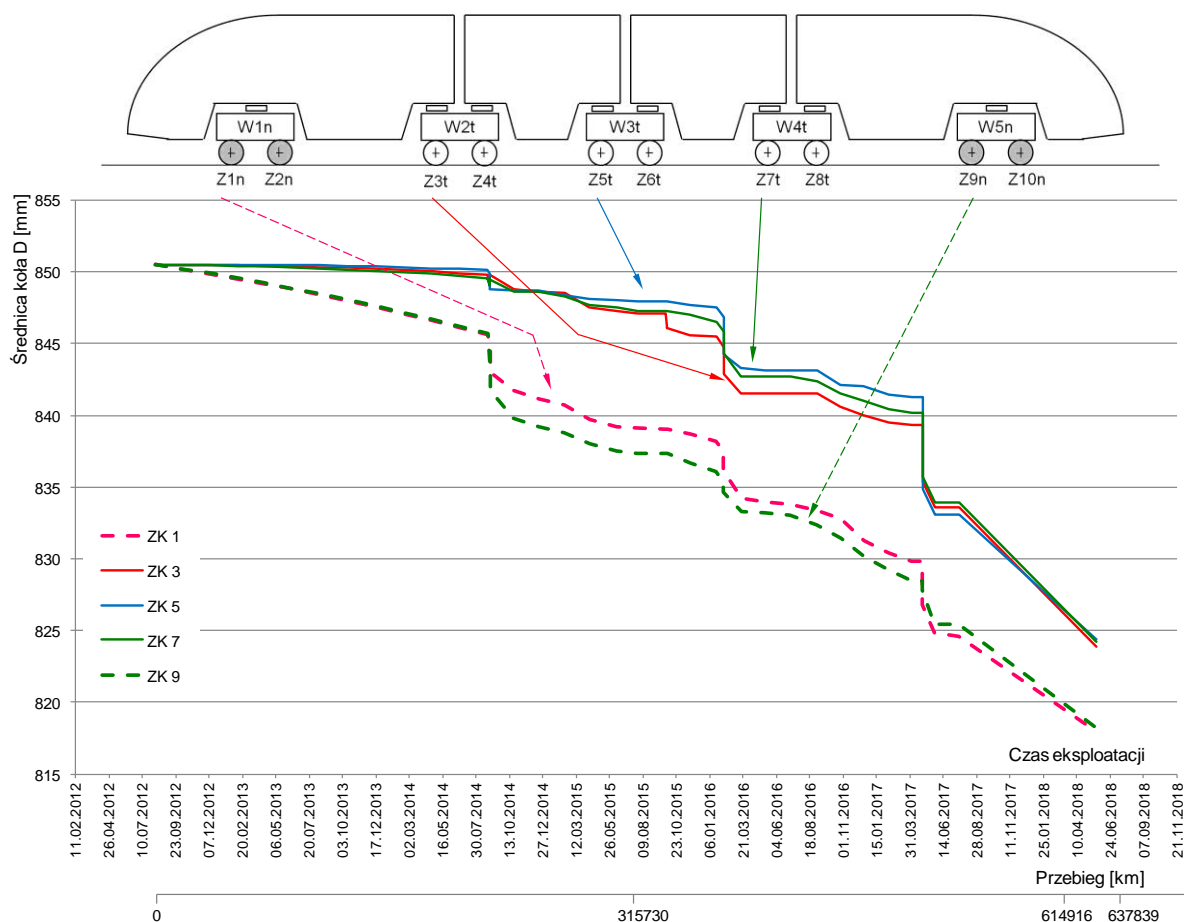
Trzecim etapem prac w ramach kolejnych badań rozpoznawczych było wyznaczenie charakterystyk zmiany średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych zestawów kołowych jak i zużycia liniowego w funkcji czasu eksploatacji i przebiegu pojazdów serii EN76. Na rysunku 4.10 przedstawiono zbiorcze przebieg zmiany średnic kół elektrycznego zespołu trakcyjnego w funkcji czasu eksploatacji i przebiegu pojazdu o numerze 026.



Rys. 4.10. Zbiorcze zestawienie zmiany średnicy kół lewych pojazdu 026 serii EN76

Analizując zbiorczy wykres przedstawiony na rysunku 4.10 w zakresie zmiany średnicy kół (lewych) elektrycznego zespołu trakcyjnego EN76 stwierdza się, że w przypadku zestawów napędnych (ZK1, ZK2, ZK9 i ZK10) spadek wymiaru średnicy kół jest większy w czasie względem zestawów tocznych (ZK3, ZK4, ZK5, ZK6, ZK7 i ZK8). Na tej podstawie stwierdza się, że intensywność zużycia zestawów napędnych jest większa względem zestawów tocznych. Na osi czasu eksploatacji dodatkowo przedstawiono przebieg pojazdu, na którym zaznaczono tylko 3 wartości. Wynika to z faktu, że dla pojazdu EN76 dokumentacja systemu utrzymania do poziomu utrzymania *P2* nie podaje limitu przejechanych kilometrów do kolejnego przeglądu, a jedynie odnosi się do czasu użytkowania (czasy jazdy). Trzy wartości przebiegu zostały zapisane wyrywkowo przez pracownika wykonującego pomiar wielkości geometrycznych zgodnie z kartą zamieszczoną w [13]. Nie przedstawiono dodatkowego wykresu zmiany średnicy kół prawych gdyż zgodnie z DSU różnica w średnicach kół prawych względem lewych nie może przekraczać 1 mm, stąd wykresy zbiorcze byłyby podobne.

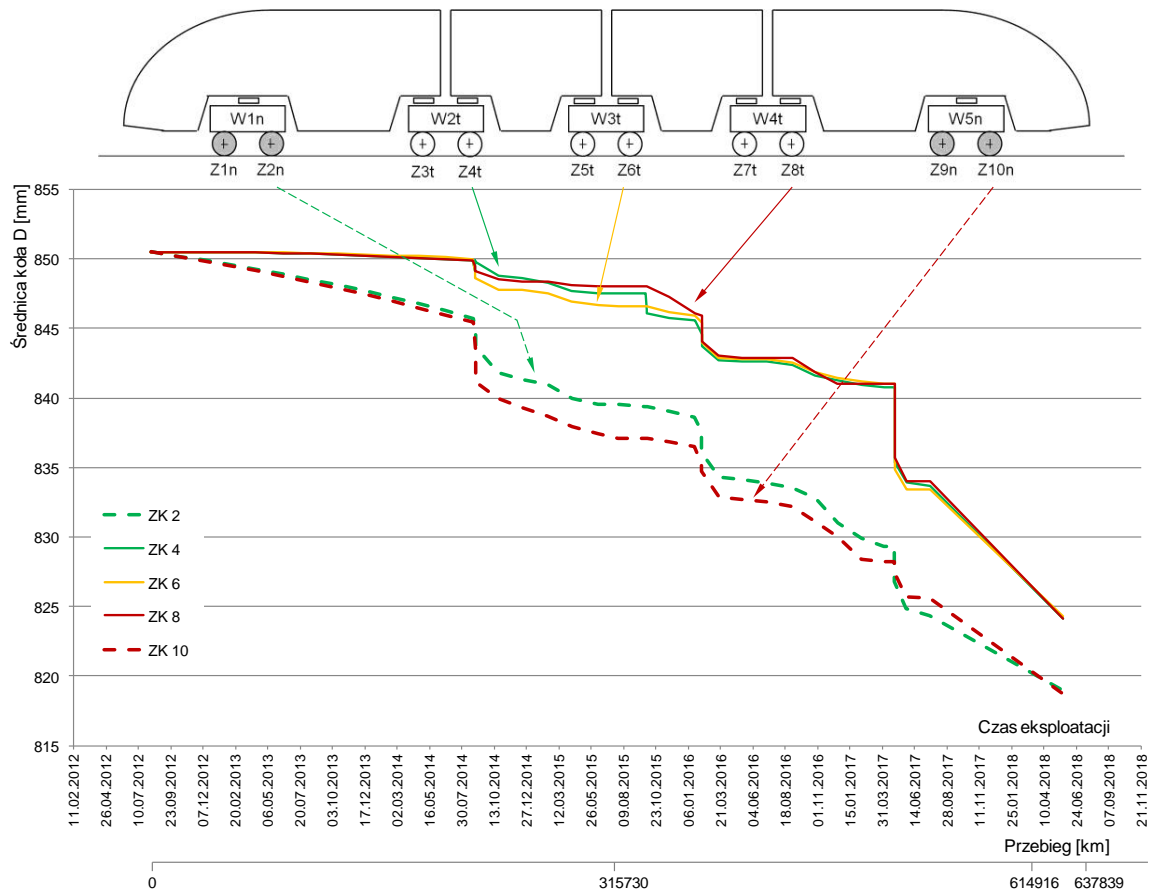
Na rysunkach 4.11 i 4.12 przedstawiono zależności zmiany średnicy kół w zestawach nieparzystych (pierwszych we wszystkich wózkach) oraz parzystych tj. drugich w wózku zgodnie z numeracją od 1 do 10.



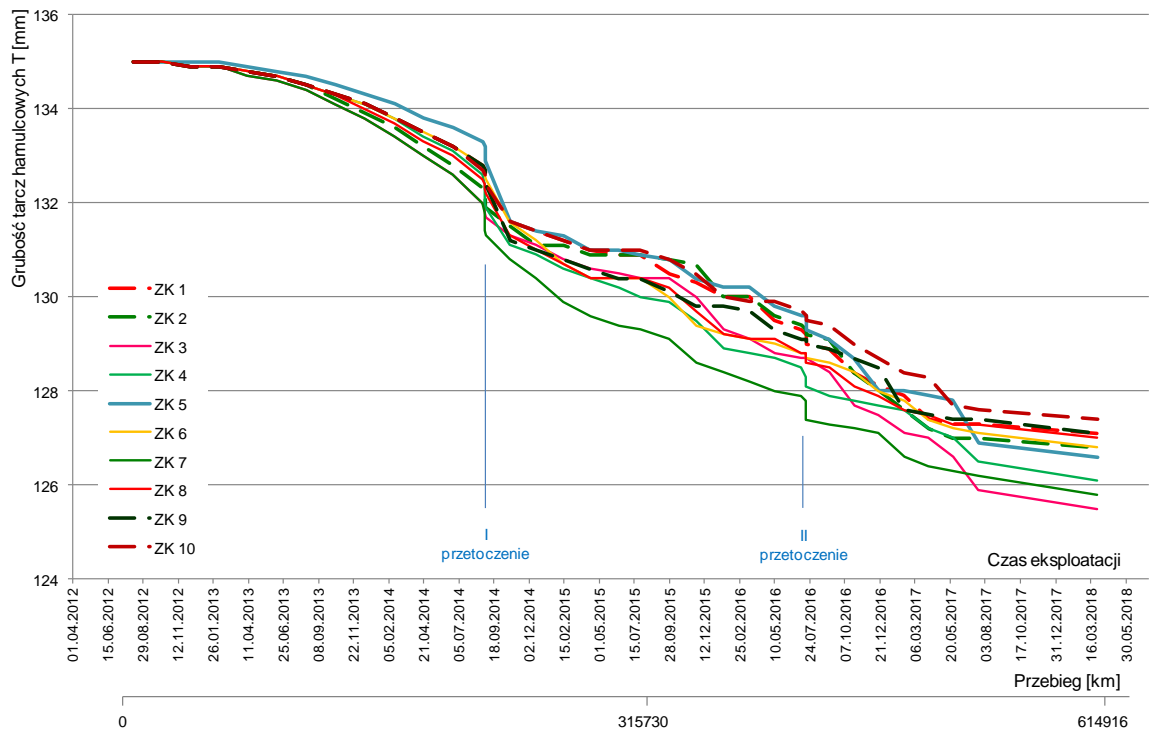
Rys. 4.11. Zmiana średnic kół nieparzystych (pierwszych w wózkach) pojazdu 026 zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji czasu eksploatacji i przebiegu

Analizując dane przedstawione na rysunkach 4.11 i 4.12 największe zużycia wykazały zestawy napędne licząc od końca pojazdu tj. ZK9 i ZK10. Dopiero po trzecim (ostatnim) przed naprawą rewizyjną przetoczeniu większe zużycia wykazały zestawy pierwszego wózka tj. ZK1 i ZK2. Mogło być to związane z większą liczbą jazd kabiną B od strony ostatniego wózka napędnego. W zakresie zestawów tocznych największe zużycia wystąpiły na drugim wózku względem pozostałych wózków tocznych. Odnosząc się do histogramów częstości względnej występowania wymiaru maksymalnego i minimalnego średnicy zestawów kołowych (rys. 4.8) uzyskano zgodność z wynikami zmiany średnicy kół w czasie eksploatacji i przebiegu analizowanego elektrycznego zespołu trakcyjnego. Na tej podstawie stwierdza się, że rozkłady częstości względnej wymiaru *max* i *min* są również cenne w ocenie pośredniej zużycia zestawów kołowych w całym procesie eksploatacji, a uzyskane wykresy (histogramy) są bardziej przejrzyste i czytelne niż liniowe charakterystyki zmiany średnicy kół. Jest to szczególnie istotne przy wieloczłonowych zespołach trakcyjnych, gdzie duża liczba zestawów kołowych utrudnia analizę wyników na zbiorczych zestawieniach zmian danego parametru geometrycznego zestawu kołowego.

Na rysunku 4.13 przedstawiono zbiorcze przebieg zmiany grubości tarcz hamulcowych elektrycznego zespołu trakcyjnego, tak samo jak w przypadku średnicy kół w funkcji czasu eksploatacji i przebiegu pojazdu o numerze 026.



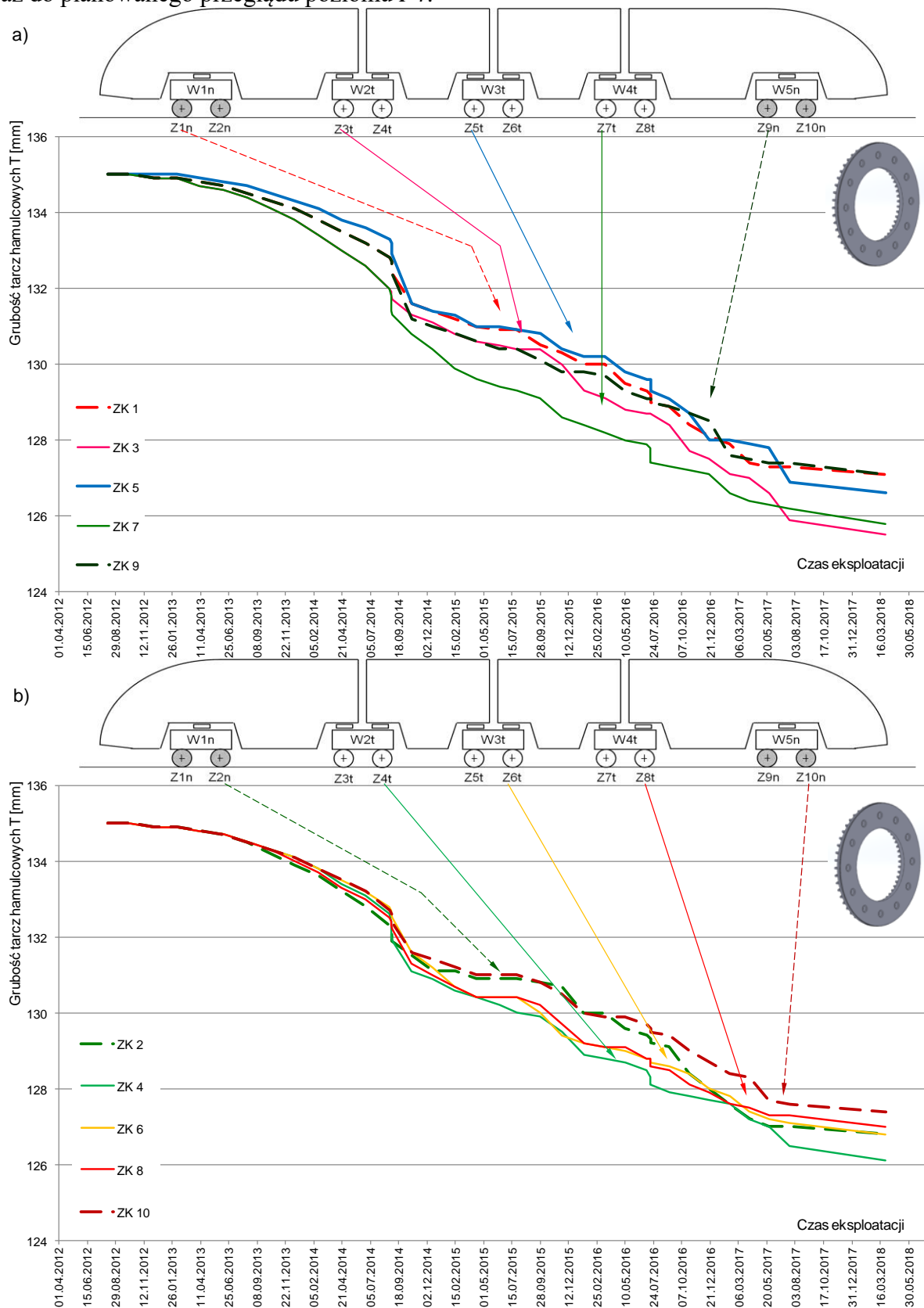
Rys. 4.12. Zmiana średni kół parzystych (drugich w wózkach) pojazdu 026 zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji czasu eksploatacji i przebiegu



Rys. 4.13. Zbiorcze zestawienie zmiany grubości tarcz hamulcowych lewych pojazdu 026 serii EN76

Analizując dane zmiany grubości tarcz hamulcowych w kolejnych przeglądach okresowych na wszystkich zestawach kołowych stwierdza się, że wszystkie zestawy napędne odznaczają się mniejszym zużycie tarcz hamulcowych względem tocznych zestawów

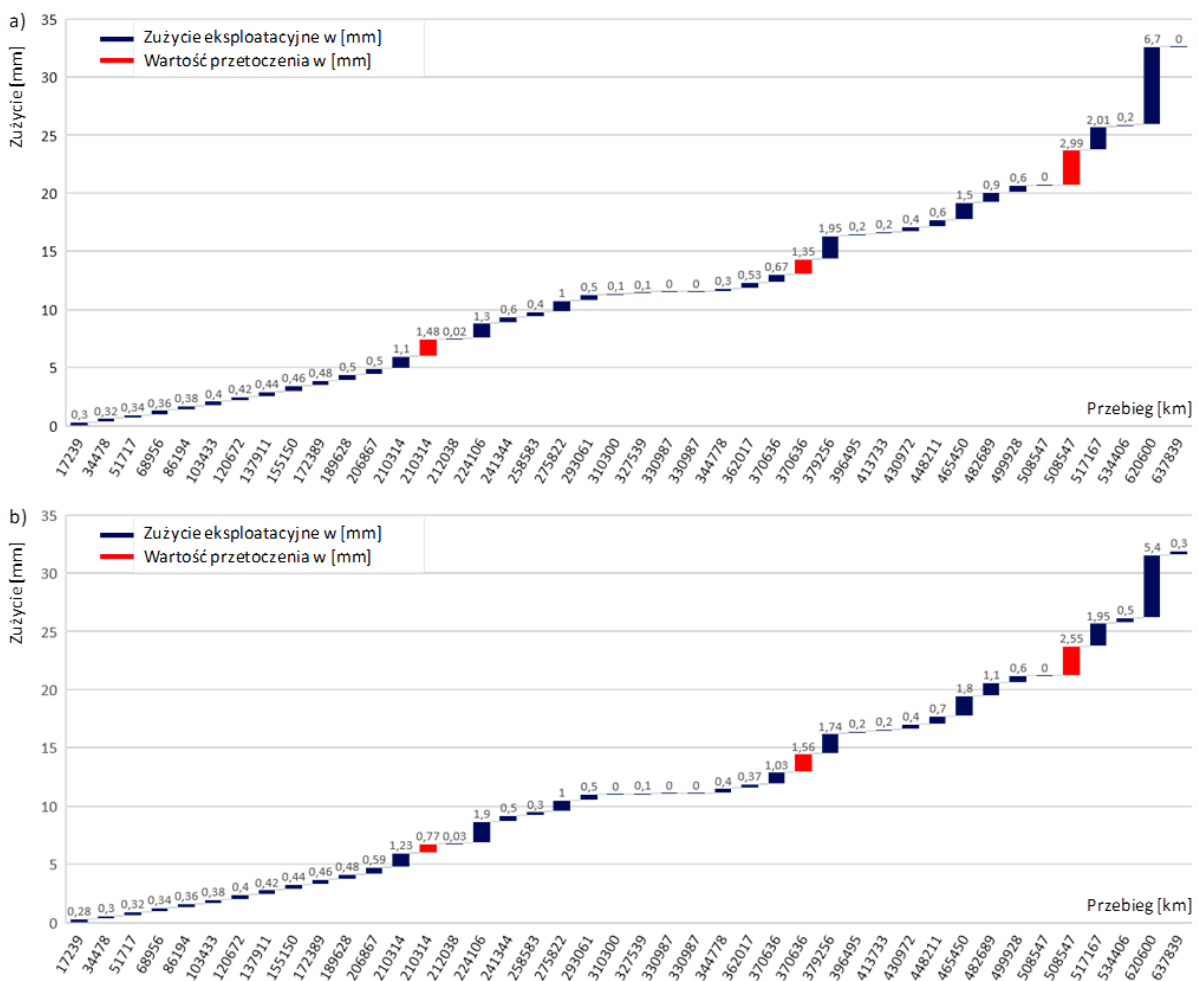
kołowych z tarczami hamulcowymi. Ten trend jest widoczny już po pierwszym przetoczeniu, aż do planowanego przeglądu poziomu P4.



Rys. 4.14. Zmiana grubości tarcz hamulcowych: a) nieparzystych (pierwszych w wózkach), b) parzystych (drugich w wózkach) pojazdu 026 zarejestrowana podczas przeglądów P2, w funkcji czasu eksploatacji

Na rysunku 4.14 przedstawiono zależność zmiany grubości tarcz hamulcowych zamocowanych do nieparzystych (pierwszych zestawów kołowych w wózku) i parzystych (drugich zestawów kołowych w wózku) analizowanego pojazdu EN76 o numerze 026.

W ocenie zużycia tarcz hamulcowych na podstawie zmiany wymiaru grubości tarcz hamulcowych na wszystkich zestawach kołowych pojazdu EN76 o numerze 026 stwierdzono, że niezależnie od lokalizacji zestawu kołowego w wózku (pierwszy lub drugi), zestawy napędne wykazywały najniższe zużycie tarcz hamulcowych względem zestawów tocznych z tarczami hamulcowymi. Wyjątkiem w przypadku analizowanego pojazdu był toczny zestaw kołowy ZK5, który cechował się zbliżonym zużyciem tarcz względem zestawu napędnego. Natomiast w ostatnim okresie przed planowanym przeglądem okresowym *P4* wszystkie zestawy napędne z tarczami hamulcowymi miały najmniejsze zużycie cierne tarcz hamulcowych.

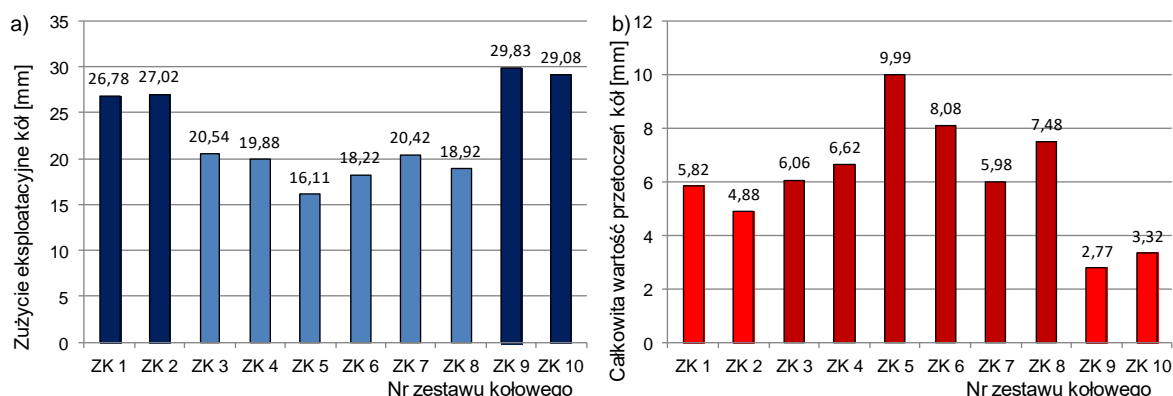


Rys. 4.15. Zużycie kół w pierwszym wózku napędowym: a) zestaw ZK1-P, b) zestaw ZK2-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu

Na podstawie danych zebranych z pomiarów średnicy kół, dla pojazdu EN76 026 obliczono zużycie kół prawych, co przedstawiono grupami dla wszystkich wózków na rysunkach 5.15-5.19. Rysunki 4.14-4.19 zamieszczono w załączniku A niniejszej pracy.

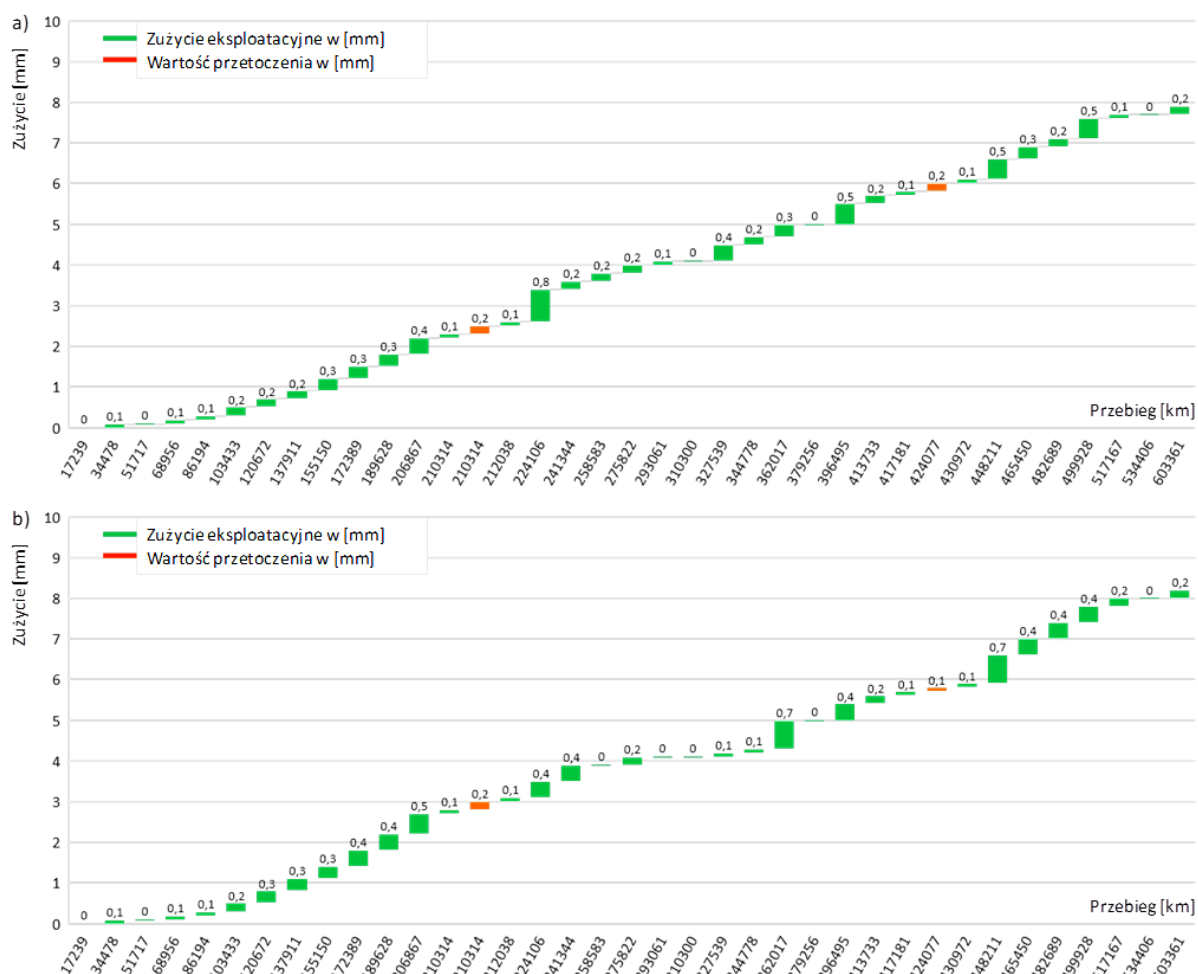
Analizując dane przedstawione na rysunkach 4.15-4.19 stwierdza się, że wraz ze wzrostem przebiegu pojazdu i czasu jego użytkowania zwiększają się wymiary przetoczeń kół zestawów kołowych oraz zużycia. Zużycie kół nie jest jednakowe, w ujęciu sumarycznym całkowite wartości zużyć na poszczególnych zestawach kołowych różnią się znacząco względem siebie. Na rysunku 4.20 przedstawiono wartości zużycia całkowitego po pięciu latach eksploatacji oraz wartości zsumowanych przetoczeń na poszczególnych kołach zestawu kołowego.

Analizując wykresy przedstawione na rysunku 4.20 stwierdzono, że w zakresie zużycia zestawy napędne wykazały największe wartości (w kolejności ZK9, ZK10, ZK2 oraz ZK1) względem zestawów tocznych. Natomiast w przypadku wartości przetoczeń kół na tokarce do zestawów kołowych, zestawy toczne były skrawane na większej głębokości.



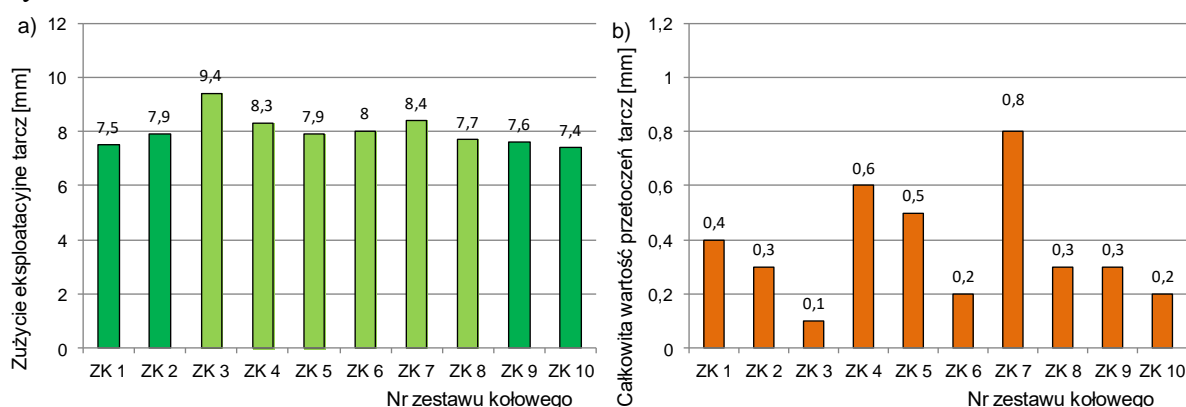
Rys. 4.20. Wartość całkowitego: a) zużycia liniowego kół, b) przetoczenia kół na poszczególnych zestawach kołowych pojazdu EN76 026

Kolejnym etapem prac była ocena zużycia tarcz hamulcowych. Na podstawie danych zebranych dla pojazdu EN76 026 obliczono zużycia tarcz, co przedstawiono dla wszystkich wózków na rysunkach 4.21-4.25. Rysunki 4.22-4.25 zamieszczono w załączniku A.



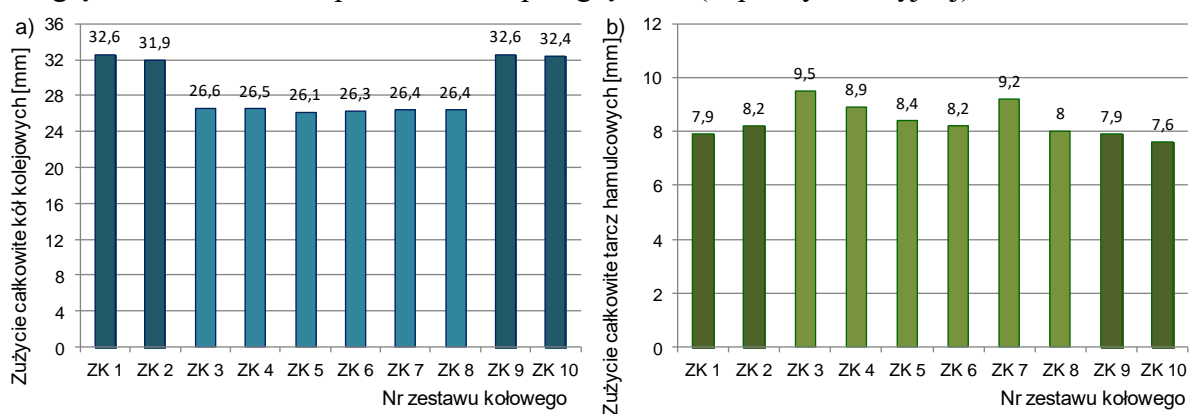
Rys. 4.21. Zużycie tarcz hamulcowych prawych w pierwszym wózku napędowym: a) zestaw ZK1-P, b) zestaw ZK2-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 4.21-4.25 stwierdza się, że wraz ze wzrostem przebiegu pojazdu i czasu jego użytkowania nie zwiększają się istotnie wartości zużycia tarcz hamulcowych, które wynoszą od 0,1 do 0,4 mm. W nielicznych przypadkach wspomniane wartości zużycia wynoszą 0,6-1,2 mm. W analizowanym 5 lat użytkowania pojazdu EN76 026 tylko dwukrotnie przetaczane były tarcze hamulcowe. Wartości przetoczeń mieszczą się w przedziale 0,1-0,8 mm. Na rysunku 4.26 przedstawiono wartości całkowitego zużycia tarcz hamulcowych oraz sumę wartości wszystkich przetoczeń tarcz hamulcowych. Na podstawie tych wykresów stwierdzono, że zestawy napędne wykazały niższe wartości zużycia tarcz hamulcowych względem zestawów tocznych, co należy wyjaśnić dodatkowym udziałem hamulca elektrodynamicznego na wózkach skrajnych pojazdu. Na zestawach napędnych średnia wartość przetoczeń wyniosła 0,30 mm, natomiast na zestawach tocznych wyniosła 0,42 mm.



Rys. 4.26. Wartość całkowitego: a) zużycia liniowego tarcz hamulcowych, b) przetoczenia tarcz hamulcowych na poszczególnych zestawach kołowych pojazdu EN76 026

Na rysunku 4.27 przedstawiono całkowite wartości zużycia kół i tarcz hamulcowych z uwzględnieniem wartości przetoczeń do przeglądu P4 (naprawy rewizyjnej).



Rys. 4.27. Wartość całkowitego zużycia eksploatacyjnego: a) kół kolejowych, b) tarcz hamulcowych do przeglądu P4 (naprawy rewizyjnej) pojazdu EN76 026

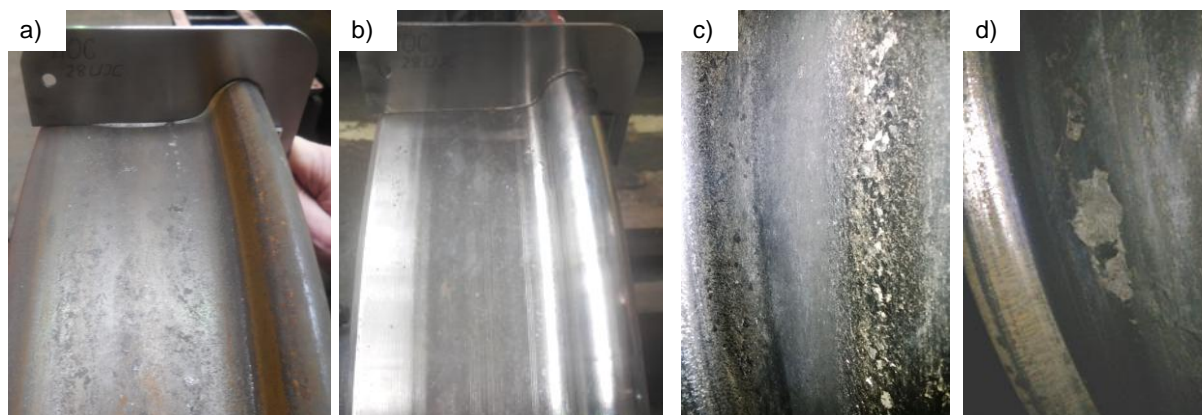
W tabeli 4.8 podano wartości średniego zużycia (kół i tarcz) na zestawach kołowych.

Tab. 4.8. Wartości średniego zużycia kół i tarcz hamulcowych na zestawach napędnych i tocznych analizowanego pojazdu EN76 026 po 5 latach eksploatacji do przeglądu P4

		Wartość średniego zużycia kół kolejowych	Wartość średniego zużycia tarcz hamulcowych
Zestawy kołowe napędne	ZK1, ZK2, ZK9 i ZK10	32,4 mm	7,9 mm
Zestawy kołowe toczne	ZK3, ZK4, ZK5, ZK6, ZK7 i ZK8	26,4 mm	8,7 mm
Różnica między zestawami napędnymi a tocznymi		6 mm	0,8 mm

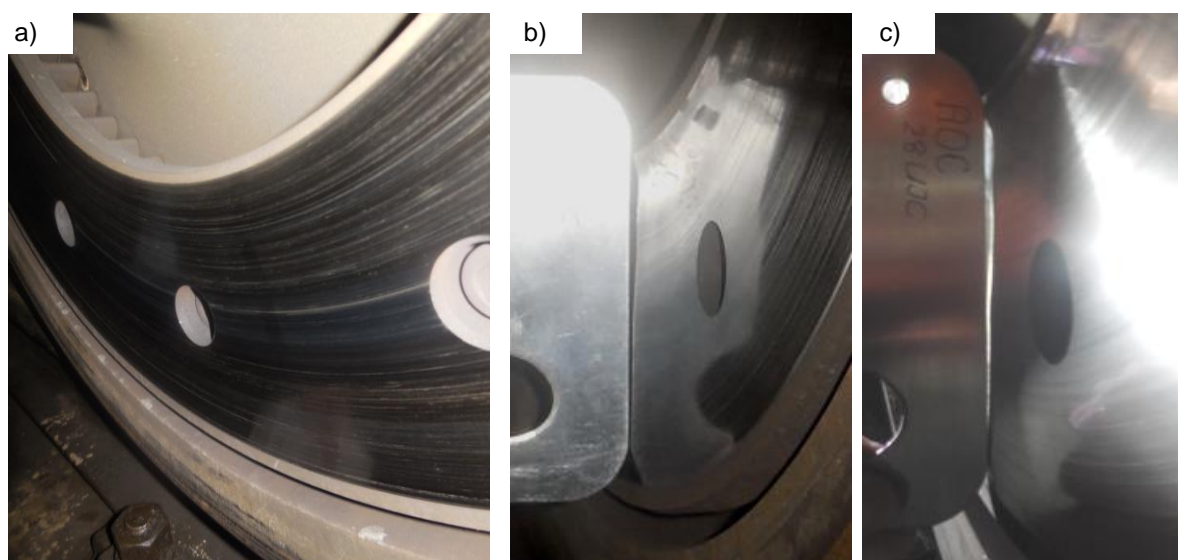
Na podstawie rysunku 4.27 oraz wartości średniego zużycia kół i tarcz przedstawionych w tabeli 4.8 stwierdzono, że między zestawami tocznymi, a napędnymi w każdym przypadku występuje różnica. W przypadku kół kolejowych zużycia są mniejsze na zestawach tocznych względem napędnych. Natomiast w przypadku tarcz hamulcowych jest to odwrotna zależność.

Na rysunku 4.28 przedstawiono przykładowe wady jakie zaobserwowano podczas przeglądu *P2* powierzchni tocznej zestawów kołowych pojazdów serii EN76. Natomiast na rysunku 4.29 przedstawiono widok tarcz hamulcowych.



Rys. 4.28. Przykładowe widoki powierzchni tocznej kół pojazdy EN76 026: a) z widocznym zużyciem w miejscu współpracy z szyną i wadami powierzchniowymi, b) widok powierzchni po przetoczeniu, c) złuszczenie, d) wykruszenie [fot. A.M. Rilo Cañas]

Na rysunkach 4.28 c) i d) przedstawiono nieliczne wady wykruszenia materiału powierzchni koła. Natomiast na rysunkach 4.28 a) i b) zaprezentowano przykład zużycia ciernego pochodzącego od kontaktu koła z szyną. Na części szerokości koła obserwuje się wytarcie powierzchni koła po przyłożeniu sprawdzianu profilu koła UIC 28. Występowanie różnych wad powierzchniowych było powodem podjęcia decyzji o toczeniu kół na tokarkach podtorowych do zestawów kołowych.



Rys. 4.29. Przykładowe widoki powierzchni ciernej tarcz hamulcowych pojazdy EN76 026: a) rysy na różnych średnicach, b), c) widoki zużycia liniowego w okolicach promienia wewnętrznego [fot. A.M. Rilo Cañas]

Analizując widoki powierzchni ciernej tarcz hamulcowych (rys. 4.29) analizowanych pojazdów serii EN76 stwierdzono występowanie jedynie zużycia liniowego w przeważającej

części na promieniu wewnętrznym tarczy oraz rysy na różnych średnicach tarczy hamulcowej. Widoczne rysy z punktu eksploatacyjnego są wynikiem różnych drobin pochodzenia metalicznego występujących w materiale ciernym oraz dostawania się ziaren piasku lub innych zanieczyszczeń z torowiska. Nie stwierdzono w żadnym przypadku występowania pęknięć termicznych opisanych w pracach, które dominują w wagonach pasażerskich z hamulcem tarczowym.

4.4. Intensywność zużycia zestawów kołowych

W podrozdziale 4.3 przedstawiono wyniki z okresowej oceny stanu zestawów kołowych elektrycznych zespołów serii EN76. W szczególności podczas przeglądów *P2* rejestrowano zmiany takich wielkości jak średnica koła *D* i grubości tarczy *T*. Na tej podstawie wyznaczono charakterystyki zmiany tych wielkości oraz zużycia w funkcji przebiegu pojazdu i czasu użytkowania. Natomiast szybkość procesu zużycia koła czy tarcz hamulcowych opisuje się przez intensywność zużycia jako zależność ubytku masowego lub objętościowego do drogi tarcia. W rozdziale 1 niniejszej pracy przedstawiono zależności (1.16) i (1.17) na intensywność zużycia. W praktyce (w pojazdach drogowych czy szynowych) intensywność zużycia odnosi się do przebiegu pojazdu lub czasu jego użytkowania. Na podstawie analizowanego pojazdu o numerze 026 w zakresie zużycia kół na średnicy tocznej oraz tarcz hamulcowych, na podstawie czasu i przebiegu pojazdu w tabeli 4.8 wyznaczono następujące intensywności zużycia koła I_K i tarczy hamulcowej I_T .

Tab. 4.8. Wartości intensywności zużycia kół I_K i tarcz hamulcowych I_T na zestawach napędnych i tocznych analizowanego pojazdu EN76 026 po 5 latach eksploatacji do przeglądu *P4*

Intensywność zużycia kół kolejowych I_K				
	w odniesieniu do czasu	Jednostka	w odniesieniu do przebiegu	Jednostka
ZK 1	$1,495 \cdot 10^{-2}$	[mm/dzień]	$5,111 \cdot 10^{-5}$	[mm/km]
ZK 2	$1,463 \cdot 10^{-2}$		$5,001 \cdot 10^{-5}$	
ZK 3	$1,220 \cdot 10^{-2}$		$4,170 \cdot 10^{-5}$	
ZK 4	$1,216 \cdot 10^{-2}$		$4,154 \cdot 10^{-5}$	
ZK 5	<u>$1,197 \cdot 10^{-2}$</u>		<u>$4,091 \cdot 10^{-5}$</u>	
ZK 6	$1,206 \cdot 10^{-2}$		$4,123 \cdot 10^{-5}$	
ZK 7	$1,211 \cdot 10^{-2}$		$4,139 \cdot 10^{-5}$	
ZK 8	$1,211 \cdot 10^{-2}$		$4,139 \cdot 10^{-5}$	
ZK 9	$1,495 \cdot 10^{-2}$		$5,111 \cdot 10^{-5}$	
ZK 10	$1,486 \cdot 10^{-2}$		$5,080 \cdot 10^{-5}$	
Intensywność zużycia kół kolejowych I_T				
ZK 1	$3,835 \cdot 10^{-3}$	[mm/dzień]	$1,309 \cdot 10^{-5}$	[mm/km]
ZK 2	$3,981 \cdot 10^{-3}$		$1,359 \cdot 10^{-5}$	
ZK 3	$4,612 \cdot 10^{-3}$		$1,574 \cdot 10^{-5}$	
ZK 4	$4,320 \cdot 10^{-3}$		$1,475 \cdot 10^{-5}$	
ZK 5	$4,078 \cdot 10^{-3}$		$1,392 \cdot 10^{-5}$	
ZK 6	$3,981 \cdot 10^{-3}$		$1,359 \cdot 10^{-5}$	
ZK 7	$4,466 \cdot 10^{-3}$		$1,524 \cdot 10^{-5}$	
ZK 8	$3,883 \cdot 10^{-3}$		$1,326 \cdot 10^{-5}$	
ZK 9	$3,835 \cdot 10^{-3}$		$1,309 \cdot 10^{-5}$	
ZK 10	<u>$3,689 \cdot 10^{-3}$</u>		<u>$1,259 \cdot 10^{-5}$</u>	
Pogrubienie np. $5,111 \cdot 10^{-5}$ to największa intensywność zużycia koła, Podkreślenie np. <u>$1,259 \cdot 10^{-5}$</u> to najmniejsza intensywność zużycia tarczy hamulcowej,				

Zawartość tabela 4.8 pozwala na ocenę intensywności zużycia na poszczególnych zestawach kołowych w odniesieniu do jednego dnia i jednego kilometra jazdy analizowanego pojazdu. Jednak zgodnie z publikacjami [70, 71, 137] intensywność zużycia zestawów ze względów praktycznych odnosi się do 100 000 km. Należy podkreślić, że na intensywność

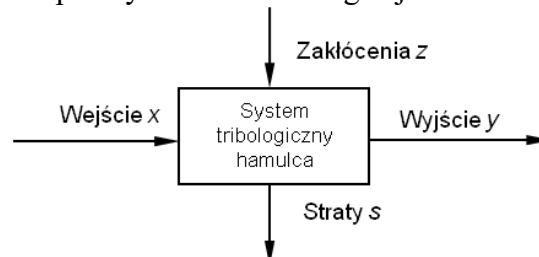
zużycia pojazdów zgodnie z [39, 136] mają takie czynniki jak technika jazdy (użytkowania pojazdu), jakość przeprowadzonej obsługi, dobór materiałów konstrukcyjnych pojazdu, naciski jednostkowe i obciążenie dynamiczne, dokładność obróbki z montażem oraz rodzaj konstrukcji pojazdu. Pierwsze wymienione czynniki odnoszą się do procesów eksploatacyjnych, natomiast druga grupa czynników to konstrukcja, technologia wytwarzania oraz dobór materiałów. Świadczy to jednoznacznie, że osoba użytkująca pojazd w jednakowym stopniu jak projektant pojazdu, konstruktor oraz jego wykonawca ma wpływ na szybkość procesów zużycia.

4.5. Modelowanie zużycia zestawów kołowych

W eksploatacji maszyn czy środkach transportu elementy współpracujące ze sobą z punktu mechanicznego nazwa się węzłami kinematycznymi lub systemami tribologicznymi (rys. 4.30). Na podstawie wyników badań czy symulacji komputerowych dokonuje się próby opisu zjawisk trybologicznych lub zmian innych parametrów roboczych za pośrednictwem modeli. Do najczęściej stosowanych modeli stosowanych w obiektach technicznych należą modele regresyjne, probabilistyczna macierz diagnostyczna, modele holistyczne, diagnostyczno-niezawodnościowe, binarna macierz diagnostyczna, modele strukturalne i modalne czy modele symulacyjne [34, 123]. Istnieją w literaturze prace związanej z badaniami pojazdów szynowych [21, 100, 138] poświęcone budowaniu różnych modeli opisujących wybrane zjawiska jak termomechaniczne, wibroakustyczne czy tribologiczne. W większości tych prac wykorzystuje się modele bazujące na analizie regresyjnej [36, 42]. Wówczas proponowane modele wykorzystują parametry techniczne lub fizyczne opisujące stan techniczny zgodnie z następującą zależnością:

$$\hat{y}_n = \hat{f}_n(x_1, x_2, \dots, x_m, a_0, a_1, \dots, a_j), \quad (4.1)$$

gdzie: x_1, x_2, \dots, x_n – parametry techniczne lub fizyczne,
 a_0, a_1, \dots, a_j – współczynniki równań regresji.



Rys. 4.30. Przykładowy system tribologiczny hamulca

W budowie czy eksploatacji maszyn jak i w pojazdach mechanicznych czy elektrycznych zgodnie z [20] bardzo często wykorzystuje się jednowymiarowe modele liniowe o jednym wejściu i jednym wyjściu na podstawie obserwacji systemu tribologicznego koła lub hamulca zgodnie z zależnością (4.2):

$$\hat{y}_n = a_0 + a_i \cdot x_i \quad (4.2)$$

lub wykorzystuje się modele jednowymiarowe nieliniowe (wykładnicze, potęgowe czy wielomianowe), co przedstawiają zależności (4.3 i 4.4):

$$\hat{y}_n = \beta \cdot a^{x_i} \quad (4.3)$$

$$\hat{y}_i = a \cdot x_i^y, \quad (4.4)$$

gdzie: a, β, y – parametry modelu regresyjnego

Na podstawie badań zużycia kół oraz tarcz hamulcowych dokonano próby modelowania zużycia kół i tarcz. W tym celu zastosowano regresyjne modele diagnostyczne. Danymi wejściowymi do pierwszego modelu są średnice kół lub ich zmiana w trakcie eksploatacji czyli ich zużycie. Na podstawie danych empirycznych wyznaczono funkcje opisujące proces zużycia kół podczas eksploatacji. Zmiany średnic kół podczas eksploatacji przedstawiono już na wcześniejszych rysunkach 4.10-4.12. Natomiast zużycie koła Zu_i wyznaczono na podstawie następującego równania (4.5):

$$Zu_i = \frac{D_{nom} - D_i}{2}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20, \quad (4.5)$$

gdzie: i – numer koła,
 D_{nom} – średnica nominalna koła,
 D_i – średnica i -tego koła.

Na podstawie analizy zużycia przedstawionej na rysunkach 4.15-4.19 stwierdzono, że do aproksymacji w pierwszej kolejności użyta zostanie funkcja wielomianowa stopnia drugiego Zu_i^{poly} . Równanie aproksymujące przyjmie postać:

$$Zu_i^{poly} = a_i t^2 + b_i t + c_i, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20 \quad (4.6)$$

gdzie: a_i, b_i, c_i – współczynniki funkcji kwadratowej (wielomianu),
 t – czas w miesiącach.

Wówczas szybkość zużywania się kół SZu_i^{poly} opisuje funkcja (5.7).

$$SZu_i^{poly} = \frac{dZu_i^{poly}}{dt}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20 \quad (4.7)$$

$$SZu_i^{poly} = a_i t + b_i, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$

Dla wyników średnicy kół uzyskanych z przeglądów $P2$ z całego okresu użytkowania pojazdu EN76 026 do przeglądu $P4$ kierując się najwyższą wartością współczynnika determinacji R^2 (zależność 4.8) sprawdzano dopasowanie danych z pomiarów do różnych funkcji [20].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.8)$$

gdzie: \hat{y}_i – wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej (na podstawie modelu),
 \bar{y} – wartość średnia cechy y (zmiennej objaśnianej),
 y_i – zmienna opisująca (rzeczywista wartość).

Dla modelu wielomianowego (funkcji kwadratowej) stopień dopasowania krzywej do danych empirycznych wyniósł $R^2=0,98$. Na podstawie danych empirycznych wyznaczono współczynniki dla modelu wielomianowego dla przykładowego koła pojazdu EN76, co przedstawiono w tabeli 4.9.

Tab. 4.9. Zestawienie wyników testu statystycznego dla modelu kwadratowego.

	Współczynnik	Wartość F	R^2
a_1	0,0068	$5,7605 \cdot 10^{-13}$	0,98
b_1	0,0167	0,73378	
c_1	0,9711	0,22643	
F - istotność dla poszczególnego współczynnika regresji			

Na podstawie analizy wyników zawartych w tabeli 4.9 stwierdzono, że model opisany funkcją kwadratową może być uproszczony do postaci ogólnej $y=a_1 \cdot x^2$, ponieważ jego pozostałe współczynniki są statystycznie nieistotne (wartość F jest większa niż 0,05) [121].

Następnie przetestowano dodatkowo model wykładniczy oraz liniowy. Model wykładniczy Zu_i^{exp} opisano funkcją (4.9).

$$Zu_i^{exp} = a_i e^{b_i t}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20, \quad (4.9)$$

gdzie: a_i, b_i – współczynniki funkcji wykładniczej,
 t – czas w miesiącach.

Szybkość zużywania się kół kolejowych SZu_i^{exp} opisuje następująca funkcja (4.10):

$$SZu_i^{exp} = \frac{dZu_i^{exp}}{dt}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20 \quad (4.10)$$

$$SZu_i^{exp} = a_i b_i e^{b_i t}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$

Dla modelu wykładniczego stopień dopasowania krzywej do danych empirycznych wyniósł $R^2=0,97$. Na podstawie danych empirycznych wyznaczono współczynniki dla modelu wykładniczego dla jednego z kół pojazdu EN76, co przedstawiono w tabeli 4.10.

Tab. 4.10. Zestawienie wyników testu statystycznego dla modelu wykładniczego.

	Współczynnik	Wartość F	R^2
a_1	2,5859	$1,7248 \cdot 10^{-14}$	0,97
b_1	0,037885	$2,4984 \cdot 10^{-27}$	
F - istotność dla poszczególnego współczynnika regresji			

Na podstawie analizy wyników zawartych w tabeli 4.10 stwierdzono, że model opisany funkcją wykładniczą może być zastosowany do modelowania zużycia kół kolejowych, ponieważ jego współczynniki są statystycznie istotne (F jest mniejsze niż 0,05). Na podstawie równania (4.9) wyznaczono czas po którym zużycie osiągnie wartość graniczną w następujący sposób:

$$Zu_{i,gr}^{exp} = a_i e^{b_i t_{gr}}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$

$$\frac{Zu_{i,gr}^{exp}}{a_i} = e^{b_i t_{gr}}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$

$$b_i t_{gr} = \ln \frac{Zu_{i,gr}^{exp}}{a_i}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20 \quad (4.11)$$

$$t_{gr} = \frac{\ln \frac{Zu_{i,gr}^{exp}}{a_i}}{b_i}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$

gdzie: t_{gr} – czas do osiągnięcia zużycia granicznego ($Zu_{i,gr}^{exp}$) w miesiącach.

Model liniowy zużycia danego koła kolejowego Zu_i^{line} opisano następującą zależnością:

$$Zu_i^{line} = a_i t + b_i, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20 \quad (4.12)$$

gdzie: a_i, b_i – współczynniki funkcji liniowej,
 t – czas w miesiącach.

Szybkość zużywania się danego i-tego koła SZu_i^{line} opisuje funkcja (4.13).

$$SZu_i^{line} = \frac{dZu_i^{line}}{dt}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$

$$SZu_i^{line} = a_i, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$
(4.13)

Należy zwrócić uwagę, że szybkość zużywania się kół w modelu liniowym jest stała, co znacząco uprasza dalsze obliczenia. Na podstawie danych empirycznych wyznaczono współczynniki wielomianu dla przykładowego i-tego koła. Stopień dopasowania funkcji liniowej do danych empirycznych wyniósł $R^2 = 0,92$. Wyniki obliczeń dla współczynników modelu liniowego zamieszczono w tabeli 4.11.

Tab. 4.11. Zestawienie wyników testu statystycznego dla modelu liniowego.

	Współczynnik	Wartość F	R^2
a_1	0.53012	$4,4352 \cdot 10^{-22}$	0,92
b_1	-5,2754	$3,0794 \cdot 10^{-5}$	
F - istotność dla poszczególnego współczynnika regresji			

Na podstawie wyników testu statystycznego zawartych w tabeli 4.11 stwierdzono, że model opisany funkcją liniową może być zastosowany do obliczeń zużycia kół, ponieważ jego współczynniki są statystycznie istotne (F jest mniejsze niż 0,05).

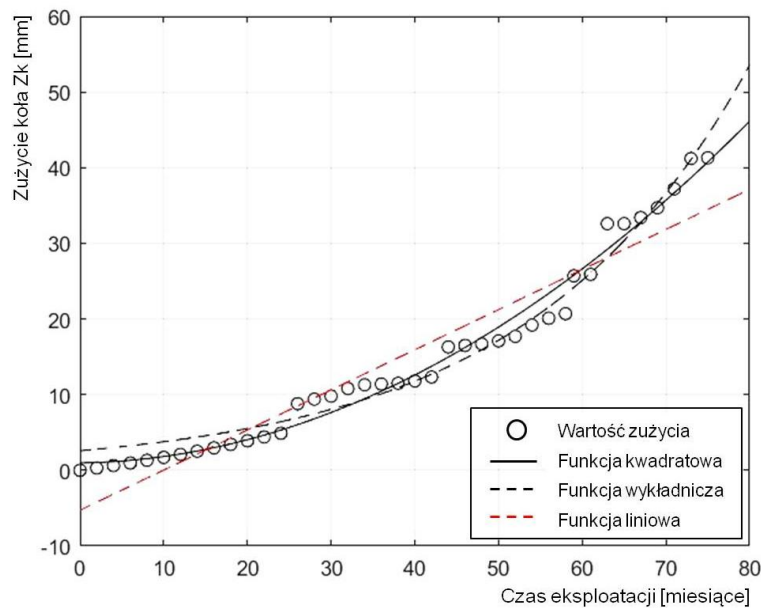
Na podstawie równania (4.11) wyznaczono czas po którym zużycie osiągnie wartość graniczną.

$$Zu_{i,gr}^{line} = a_i t_{gr} + b_i, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$

$$t_{gr} = \frac{Zu_{i,gr}^{line} - b_i}{a_i}, i \in N \cap 1 \leq i \leq 20$$
(4.14)

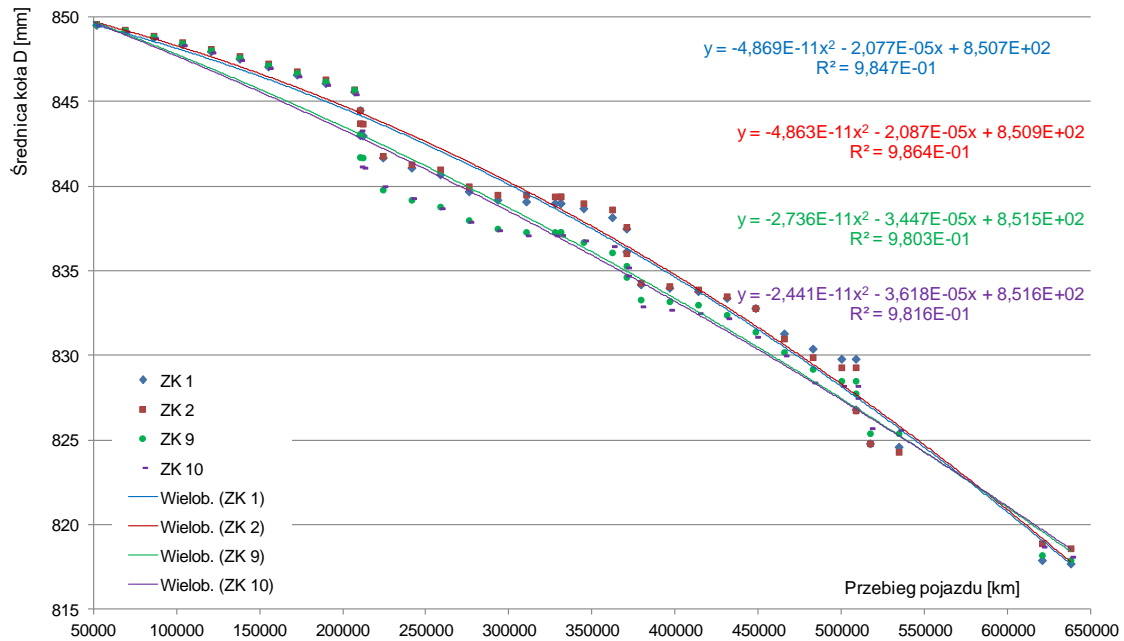
gdzie: t_{gr} – czas do osiągnięcia zużycia granicznego ($Zu_{i,gr}^{line}$) w miesiącach.

Mając na uwadze fakt, że opracowany model liniowy uwzględnia tylko jedną zmienną niezależną, a jego stopień dopasowania wynosi $R^2 = 0,92$ należy uznać ten model za najprostszy i wystarczający do oszacowania zużycia poszczególnych kół kolejowych pojazdu EN76. Szybkość zużywania się kół w pojeździe można przyjąć za stałą dlatego model może być użyty do szybkiego wyznaczenia zużycia i-tego koła kolejowego pojazdu. Na rysunku 4.31 przedstawiono wizualizację zastosowania trzech modeli do wyników zużycia przykładowego koła kolejowego elektrycznego zespołu trakcyjnego EN76.

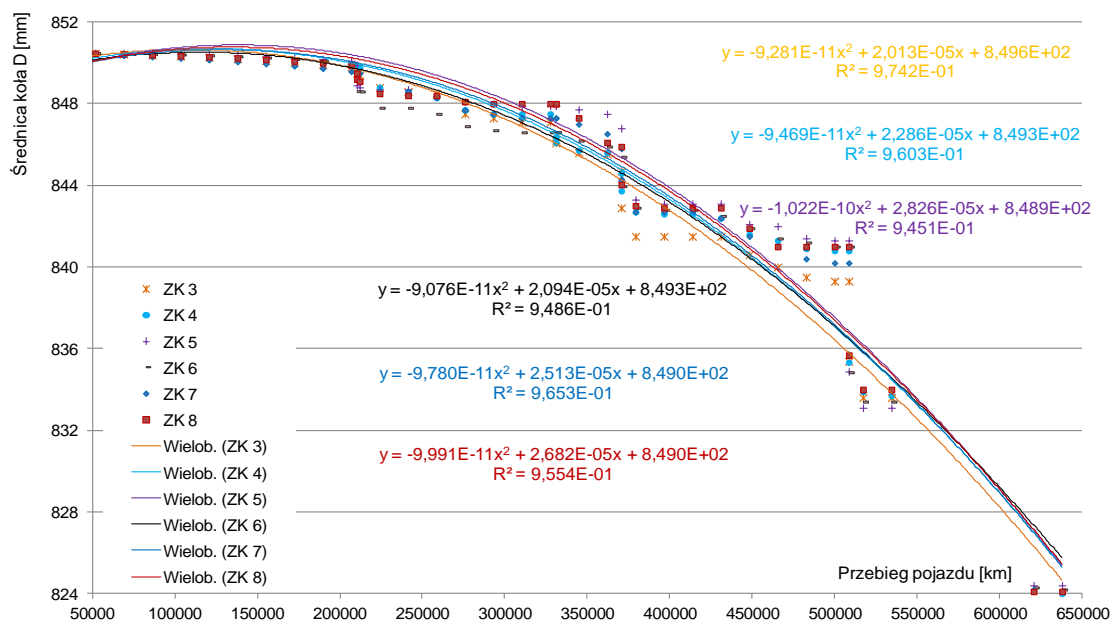


Rys. 4.31. Wizualizacja dopasowania modelu liniowego, kwadratowego i wykładniczego do wyników zużycia koła pojazdu EN76

Analizując dopasowanie modeli do danych empirycznych zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 4.31 stwierdza się, że model liniowy i wykładniczy w pierwszym i ostatnim okresie tj. na początku i na końcu czasu eksploatacji do naprawy rewizyjnej odsuwają się od wyników rzeczywistych. Zważywszy, że ostatni okres eksploatacji kół jest istotny z punktu szacowania dalszego czasu i przebiegu pojazdu, do dalszych analiz związanych z późniejszą migracją zestawów kołowych lub wózków wykorzystano będzie model kwadratowy. W niektórych przypadkach jak zużycie tarcz hamulcowych wykorzystano modele liniowe. Na wykresach przedstawionych na rysunkach 4.32 i 4.33 podano zależności opisujące zmiany średnicy poszczególnych kół w funkcji przebiegu z jednoczesnym wskazaniem współczynnika determinacji. Dla lepszej widoczności modeli i jego przebiegu celowo na wykresach zastosowano różne kolory.

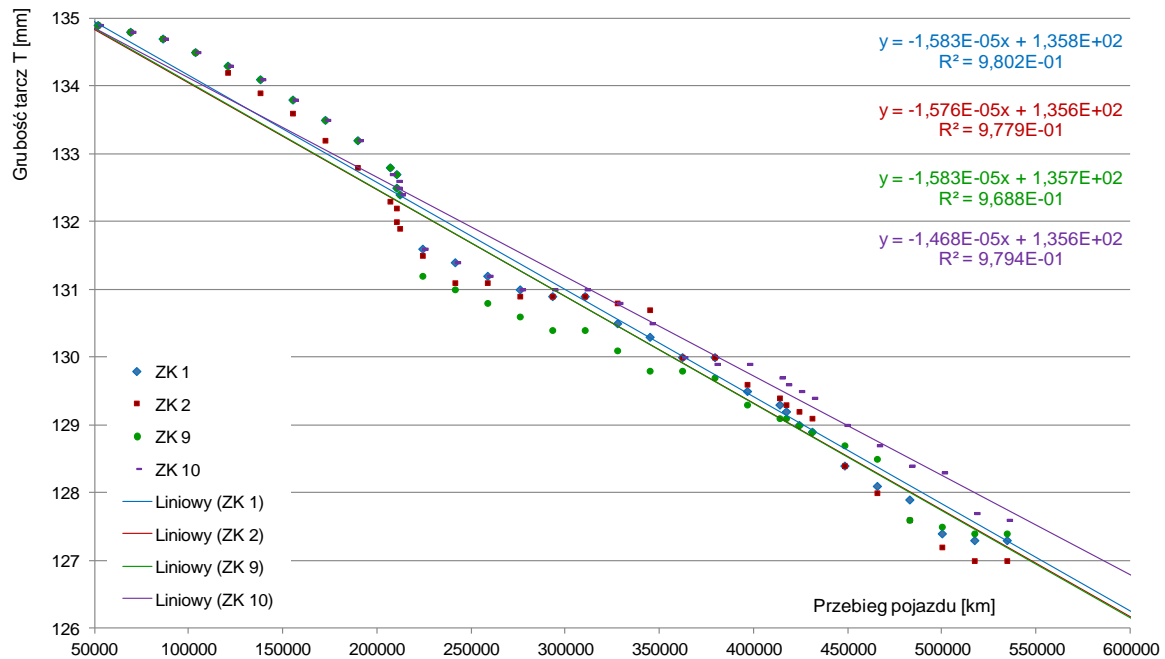


Rys. 4.32. Zależność średnicy kół w okręgu tocznym D dla zestawów napędnych ZK1, ZK2, ZK9 i ZK10 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

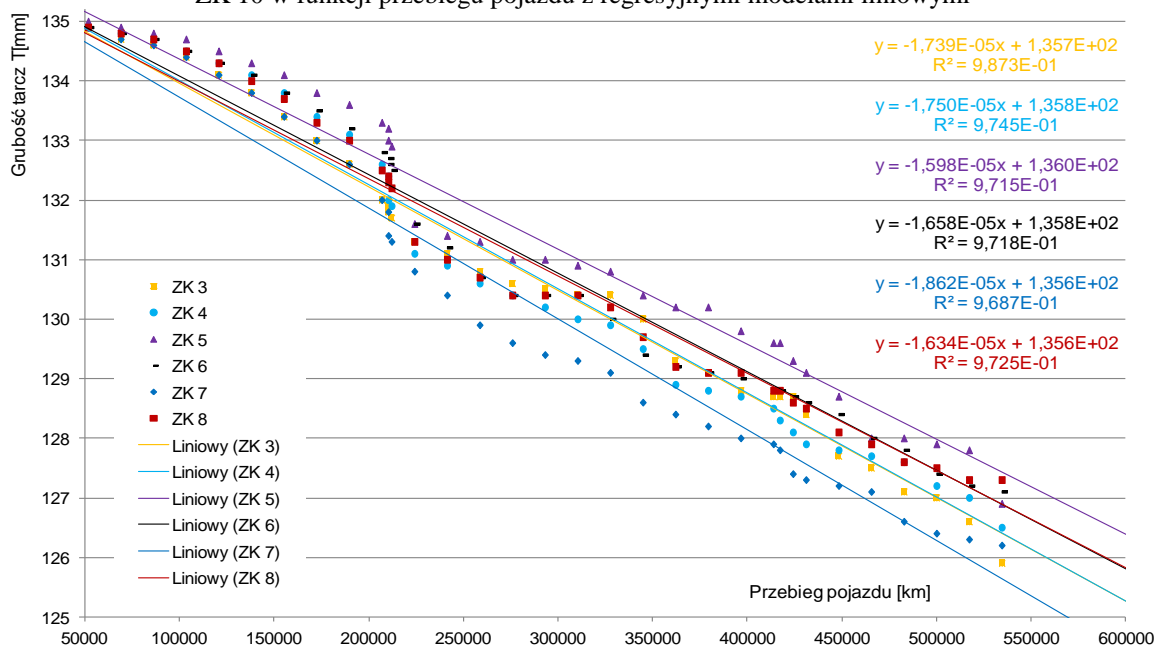


Rys. 4.33. Zależność średnicy kół w okręgu tocznym D dla zestawów tocznych ZK3, ZK4, ZK5, ZK6, ZK7 i ZK8 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 4.32 i 4.33 z modelami opisującymi zmiany średnicy kół w funkcji przebiegu pojazdu, że w przypadku zestawów napędnych uzyskano charakterystyki zbliżone do funkcji liniowej z mniejszymi wartościami współczynników kierunkowych a ($2-5 \cdot 10^{-11}$) przy x^2 , co świadczy o większym nachyleniu funkcji do osi przebiegu pojazdu w przeciwieństwie do charakterystyk na zestawach tocznych. W tym przypadku wartości współczynników kierunkowych przy x^2 są większe w przedziale $9-10 \cdot 10^{-11}$, a przebiegi funkcji kwadratowej łagodniej przebiegają w pierwszej fazie w kierunku osi przebiegu analizowanego pojazdu. Na rysunkach 4.34 i 4.35 przedstawiono również kwadratowe modele regresyjne dla zmiany grubości tarcz hamulcowych w funkcji przebiegu z podziałem dla zestawów napędnych i tocznych.



Rys. 4.34. Zależność grubości tarcz hamulcowych T zamocowanych na zestawach napędnych ZK1, ZK2, ZK9 i ZK10 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami liniowymi



Rys. 4.35. Zależność grubości tarcz hamulcowych T zamocowanych na zestawach tocznych ZK3, ZK4, ZK5, ZK6, ZK7 i ZK8 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami liniowymi

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 5.34 i 5.35 z modelami opisującymi zmiany grubości tarcz hamulcowych w funkcji przebiegu dla wszystkich 10 zestawów kołowych stwierdzono, że współczynniki kierunkowe funkcji liniowych a , zawierają się w przedziale od $-1,468 \cdot 10^{-5}$ do $-1,862 \cdot 10^{-5}$ natomiast wyrazy wolne b od 135,59 do 135,98. Funkcję liniową wybrano do modelowania zmiany grubości tarczy ze względu na wysoki współczynnik determinacji R^2 jednak wartości wyrazów wolnych powinny wynieść w każdym przypadku 135. Jednak wybór funkcji liniowej jako modelu regresyjnego wynikał z późniejszego szacowania przebiegu pojazdu szynowego (elektrycznego zespołu trakcyjnego) przy dłuższej eksploatacji niż do przeglądu P4.

Wykorzystanie nieliniowych (kwadratowych) modeli regresyjnych opisujących zmiany średnicy kół w funkcji przebiegu pojazdu wynikało również z potrzeby szacowania przebiegu pojazdu do osiągnięcia przez zestaw kołowy kresowego wymiaru średnicy kół pojazdu EN76. W tym celu na podstawie wyznaczonych modeli kwadratowych należało wyznaczyć wyróżniki równań kwadratowych Δ zgodnie z zależnością (4.15) oraz miejsca zerowe przy założeniu, że $\Delta > 0$ na podstawie następujących wzorów (4.16) [116].

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c \quad (4.15)$$

$$x_{1_0} = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}, \quad x_{2_0} = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} \quad (4.16)$$

Miejsca zerowe funkcji kwadratowej opisane równaniami (4.15) i (4.16) odnoszą się do wartości 0 na osi średnicy kół D . W celu oszacowania wartości przebiegu dla wymiaru kresowego należało obliczyć miejsca zerowe dla tego wymiaru. Wyznaczono układ równań opisany zależnością (4.17) dla przykładowego napędzonego zestawu kołowego ZK 1. Dla nowego równania funkcji kwadratowej obliczono miejsca zerowe przy przecięciu z funkcją stałą $y=780$.

$$\begin{cases} y_{ZK1} = -5 \cdot 10^{-11} x^2 - 2 \cdot 10^{-5} x + 850,71 \\ y = 780 \end{cases} \quad \begin{cases} 5 \cdot 10^{-11} x^2 + 2 \cdot 10^{-5} x - 70,71 = 0 \\ \Delta = (2 \cdot 10^{-5})^2 - 4 \cdot 5 \cdot 10^{-11} \cdot (-70,71) = 1,454 \cdot 10^{-8}; \Delta > 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} x_{1_780} = \frac{-2 \cdot 10^{-5} - \sqrt{1,454 \cdot 10^{-8}}}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-11}} = 1005902,15 \\ x_{2_780} = \frac{-2 \cdot 10^{-5} + \sqrt{1,454 \cdot 10^{-8}}}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-11}} = -1405902,15 \end{cases}$$

Wymiar kresowy średnicy kół elektrycznego zespołu trakcyjnego który wynosi 780 mm został wstawiony do wszystkich równań kwadratowych zawartych na wykresach rysunków 4.32 i 4.33. Następne przy użyciu zależności (4.16) oraz (4.17) obliczono wartość miejsca zerowego w pierwszej ćwiartce układu współrzędnych, które jednocześnie odpowiadają przebiegowi pojazdu w km dla analizowanego zestawu kołowego. W tabeli 4.14 zawarto przebiegi dla wszystkich 10 zestawów kołowych do osiągnięcia kresowego wymiaru średnicy kół.

Analizując oszacowane wartości przebiegów jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny na podstawie zastosowania regresyjnych modeli kwadratowych w zakresie średnicy kół D przedstawionych w tabeli 4.14 stwierdza się, że zestawy kołowe pozwoliłyby na użytkowanie pojazdu do około 1 miliona kilometrów do osiągnięcia wymiaru kresowego na średnicy kół 780 mm. Ze względu na zapisy w DSU pojazdu, które oprócz przebiegu pojazdu również

narzuca ograniczenie czasowe, pojazd został skierowany na przegląd *P4* z przebiegiem ponad 600 tys. km.

Tab. 4.14. Oszacowane wartości przebiegów jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny przy użytkowaniu zestawów kołowych do wymiaru kresowego w oparciu o kwadratowe modele regresyjne.

Oznaczenie zestawu kołowego	Oszacowany przebieg zestawu kołowego w [km]	Wymiar kresowy średnicy koła w [mm]	Wymiar konstrukcyjny średnicy koła nowego w [mm]
ZK 1	1010534,04	780	850
ZK 2	1011626,40		
ZK 3	980943,23		
ZK 4	984734,16		
ZK 5	971012,40		
ZK 6	996818,29		
ZK 7	978439,23		
ZK 8	975848,10		
ZK 9	1105246,53		
ZK 10	<u>1124600,34</u>		

W przypadku tarcz hamulcowych również przeprowadzono szacowane przebiegu pojazdu dla każdego zestawu kołowego z zamocowanymi tarczami.

$$\begin{cases} y_{ZK_T1} = -1,583 \cdot 10^{-5} x + 135,75 \\ y = 125 \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} x_{1_125} = \frac{125 - 135,75}{-1,583 \cdot 10^{-5}} = 679\,090,33 \\ y = 125 \end{cases}$$

Wykorzystując liniowe modele regresyjne oraz wymiar kresowego zużycia tarcz wynoszącego 135 mm zapisano układ równań zgodnie z zależnością (5.18). W tabeli 4.15 zawarto przebiegi dla wszystkich 10 zestawów kołowych do osiągnięcia kresowego wymiaru grubości tarcz hamulcowych.

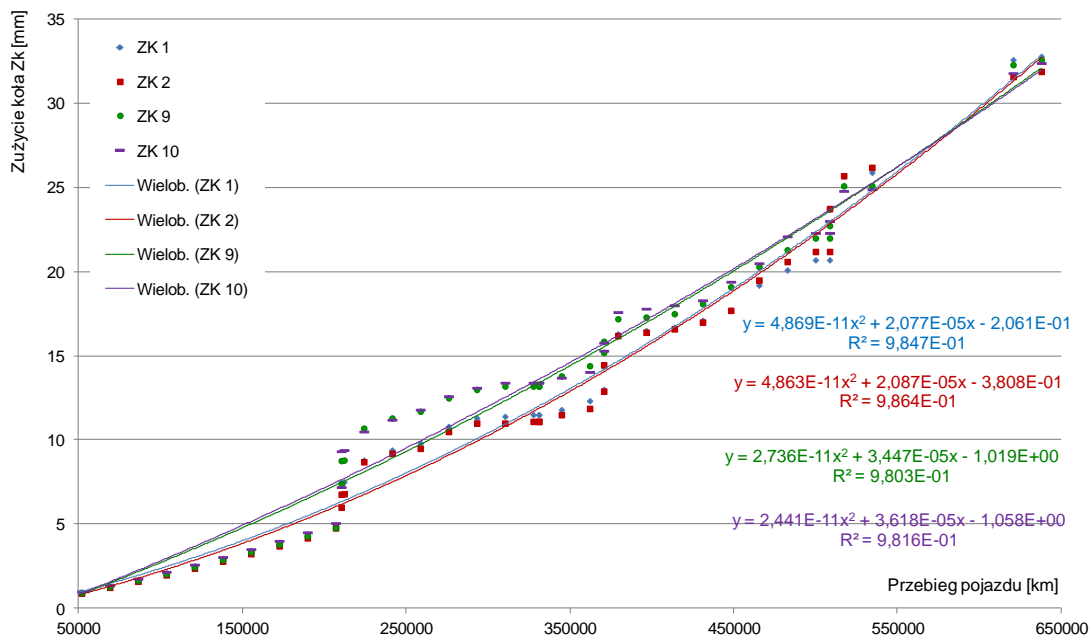
Tab. 4.15. Oszacowane wartości przebiegów jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny przy użytkowaniu zestawów kołowych z tarczami hamulcowymi do wymiaru kresowego ich zużycia w oparciu o liniowe modele regresyjne.

Oznaczenie zestawu kołowego	Oszacowany przebieg zestawu kołowego z tarczami hamulcowymi w [km]	Wymiar kresowy grubości tarcz hamulcowych w [mm]	Wymiar konstrukcyjny grubości tarcz hamulcowych w [mm]
ZK 1	679090,33	125	135
ZK 2	674492,39		
ZK 3	615296,15		
ZK 4	614857,14		
ZK 5	687108,89		
ZK 6	648371,53		
ZK 7	568743,29		
ZK 8	650550,80		
ZK 9	672773,22		
ZK 10	<u>721389,65</u>		

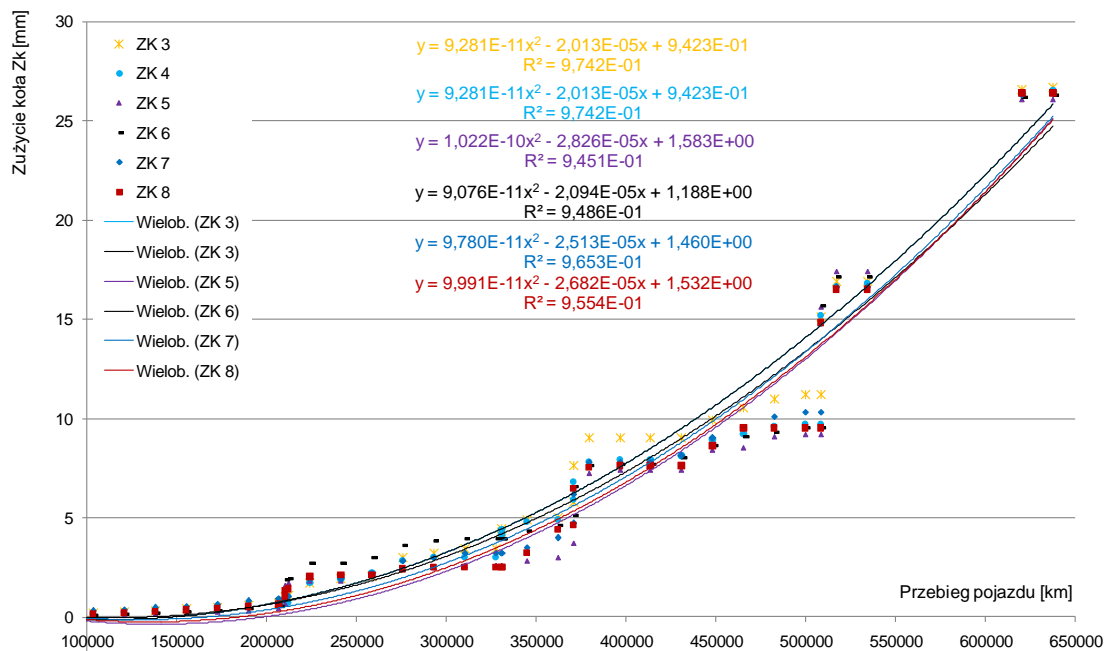
Analizując oszacowane wartości przebiegów jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny na podstawie zastosowania regresyjnych modeli liniowych wymiaru grubości tarcz hamulcowych *T* przedstawionych w tabeli 4.15 stwierdza się, że zestawy kołowe pozwoliłyby na użytkowanie pojazdu do około 650 tys. kilometrów do osiągnięcia wymiaru kresowego

grubości tarcz 125 mm. Jest to dużo mniejsza wartość przebiegu względem oszacowanych wartości w przypadku średnicy kół (1 mln km). Należy podkreślić, że zgodnie z tabelą 4.10 zestaw kołowy ZK7 z tarczami hamulcowymi uzyskał najniższy przebieg względem pozostałych zestawów kołowych. Zgodnie z rysunkiem 4.9 z rozkładami częstości względnej występowania wymiaru maksymalnego i minimalnego podczas przeglądów, również zestaw ZK7 w większości przeglądów P2 wykazywał najmniejszy wymiar grubości tarcz.

Na podstawie wyników z pomiarów średnicy kół D oraz grubości tarcz T przeprowadzono również modelowanie zużycia kół Z_k i tarcz hamulcowych Z_t . Podobnie jak w przypadku modelowania średnicy kół i grubości tarcz w funkcji przebiegu, również zużycie zostało zamodelowane w funkcji przebiegu pojazdu przy użyciu regresyjnych modeli liniowych i nieliniowych. Wybór modeli wynikał z uzyskania najwyższej wartości współczynnika determinacji R^2 przedstawionej zależnością (4.5).

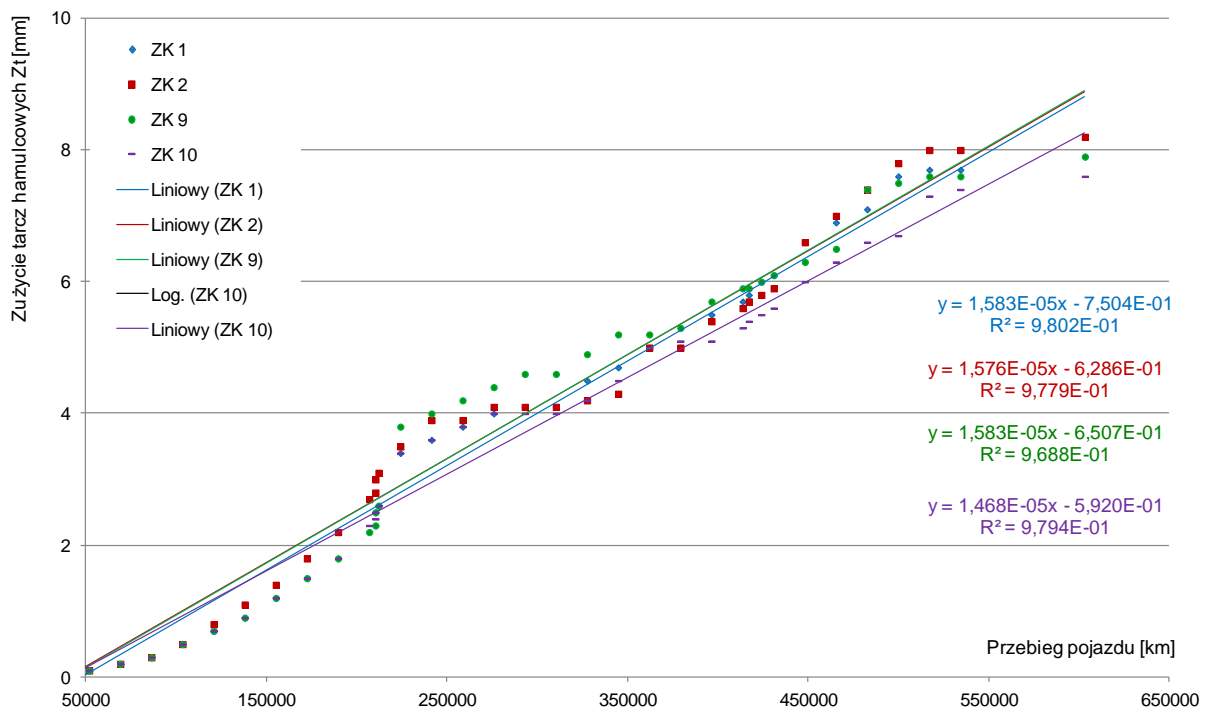


Rys. 4.36. Zależność zużycia na średnicy kół w okręgu tocznym D dla zestawów napędnych ZK 1, ZK 2, ZK 9 i ZK 10 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

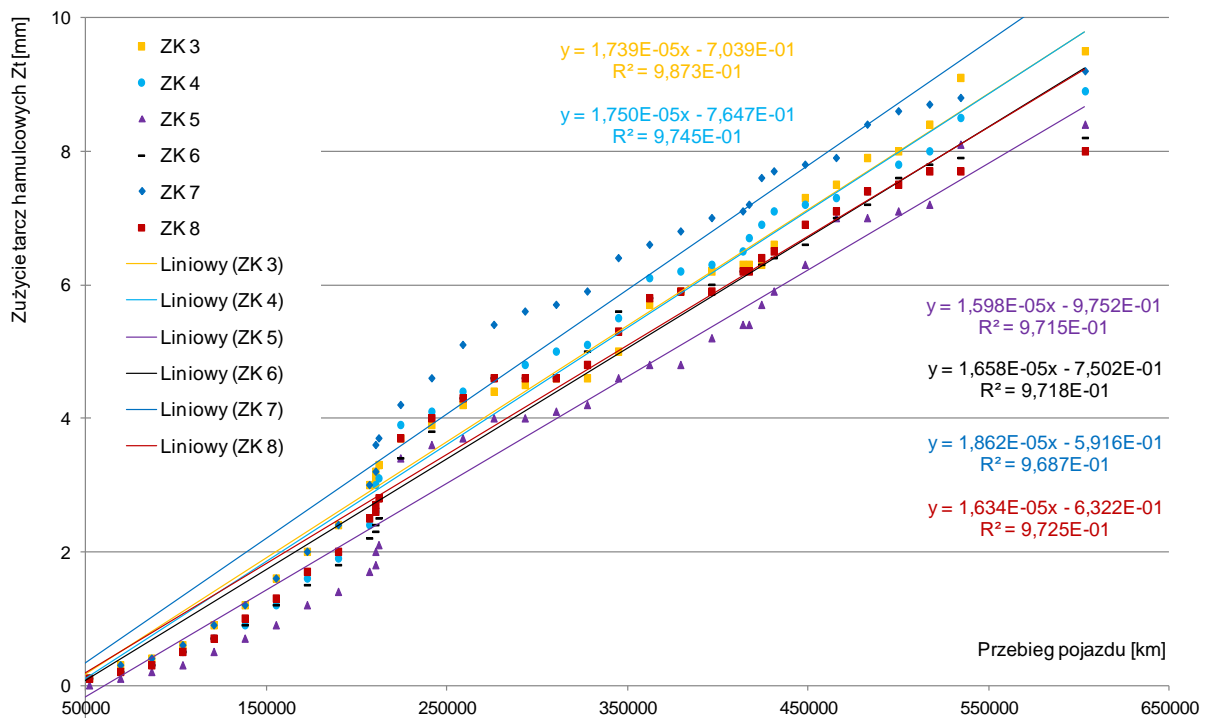


Rys. 4.37. Zależność zużycia na średnicy kół w okręgu tocznym D dla zestawów tocznych ZK 3, ZK 4, ZK 5, ZK 6, ZK 7 i ZK 8 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

Na rysunkach 4.36-4.39 przedstawiono zależność zużycia od przebiegu pojazdy z podziałem na zestawy toczne i napędne z zapisanymi regresyjnymi modelami liniowymi i kwadratowymi.



Rys. 4.38. Zależność zużycia na grubości tarcz hamulcowych T zamocowanych na zestawach napędnych ZK 1, ZK 2, ZK 9 i ZK 10 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami liniowymi



Rys. 4.39. Zależność zużycia na grubości tarcz hamulcowych T zamocowanych na zestawach tocznych ZK 3, ZK 4, ZK 5, ZK 6, ZK 7 i ZK 8 w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami liniowymi

Na podstawie wyznaczonych regresyjnych modeli zużycia kół i tarcz hamulcowych przedstawionych na rysunkach 4.36-4.39 przeprowadzono próbę oszacowania przebiegu do osiągnięcia kresowego zużycia dla kół wynoszącego 70 mm i dla tarcza wynoszącego 10 mm.

W tym celu wyprowadzono układy równań dla wszystkich regresyjnych modeli i funkcji stałych będących wymiarem kresowego zużycia. W tabeli 4.16 przedstawiono wyniki oszacowanych przebiegów dla każdego zestawu kołowego dla maksymalnego kresowego zużycia kół i tarcz hamulcowych po zastosowaniu regresyjnych modeli zmiany średnicy kół i grubości tarcz oraz modeli zużycia kół na średnicy D i zużycia tarcz na ich grubości. Dodatkowo zgodnie z zależnością (4.19) wyznaczono błąd względny procentowy dla obu modeli bazujących na zmianie danego parametru (średnicy D lub grubości T) oraz zużyciu w funkcji przebiegu [127].

$$\delta = \frac{|x - x_z|}{x} \cdot 100\% , \quad (4.19)$$

gdzie: x – wartość przebiegu z modelu zmiany parametru D (T),
 x_z – wartość przebiegu z modelu zużycia D (T).

Tab. 4.16. Oszacowane wartości przebiegów jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny przy użytkowaniu zestawów do wymiaru kresowego w oparciu o modele regresyjne zmiany parametrów D i T oraz zużycia D i T z błędem względnym procentowym.

Średnica koła D			
Zestaw kołowy	Przebieg pojazdu w oparciu o model zmiany średnicy D w funkcji przebiegu	Przebieg pojazdu w oparciu o model zużycia na średnicy koła D w funkcji przebiegu	Błąd względny procentowy [%]
ZK 1	1010534,04	1002822,78	0,8
ZK 2	1011626,40	1001008,64	1,0
ZK 3	980943,23	977836,17	0,3
ZK 4	984734,16	977836,17	0,7
ZK 5	971012,40	968052,05	0,3
ZK 6	996818,29	993700,32	0,3
ZK 7	978439,23	975426,42	0,3
ZK 8	975848,10	972857,78	0,3
ZK 9	1105246,53	1078296,60	2,4
ZK 10	<u>1124600,34</u>	<u>1095632,43</u>	2,6
Średnia	1013980,27	1004346,94	0,9
Grubość tarcz T			
ZK 1	679090,33	584308,28	14,0
ZK 2	674492,39	594631,98	11,8
ZK 3	615296,15	534565,84	13,1
ZK 4	614857,14	527731,43	14,2
ZK 5	687108,89	564755,94	17,8
ZK 6	648371,53	557889,02	14,0
ZK 7	568743,29	505284,64	11,2
ZK 8	650550,80	573304,77	11,9
ZK 9	672773,22	590606,44	12,2
ZK 10	<u>721389,65</u>	<u>640871,93</u>	11,2
Średnia	653267,34	567395,03	13,1

Analizując wyniki oszacowanych wartości przebiegów dla wszystkich zestawów kołowych w oparciu o dwa typy modeli regresyjnych (w oparciu o zmianę parametru oraz na podstawie zużycia), co przedstawiono dla średnicy koła D grubości tarczy T w tabeli 4.16 stwierdzono, że w obu przypadku modeli uzyskano zbieżne i zadowalające wyniki. Średni błąd względny procentowy dla obu modeli wyniósł w przypadku średnicy kół 1%, a w przypadku grubości tarcz hamulcowych 13%. Modele zamiennie można stosować w przyszłym określeniu przebiegu zestawów kołowych. Jednak model bazujący na wynikach zmiany danego parametru uzyskiwanego z przeglądu $P2$ jest mniej pracochłonny od modelu zużycia i przy mniejszej liczbie działań otrzymuje się wartość przebiegu.

4.6. Podsumowanie z badań zużycia kół i tarcz hamulcowych pojazdu EN76

Przeprowadzone analizy zarejestrowanych dwóch parametrów geometrycznych zestawów kołowych (średnicy kół D oraz grubości tarcz T) podczas przeglądów $P2$ od chwili czasowej przekazania przez producenta pojazdów EN76 przewoźnikowi aż do przeglądu $P4$ (naprawy rewizyjnej) pozwoliły na wyciągnięcie ogólnego wniosku, że konstrukcja zestawu kołowego nie pozwala na bezinwazyjną wymianę elementu w którym procesy zużyciowe przebiegają szybciej względem drugiego elementów, w którym te procesy przebiegają wolniej. Dotyczy to tarcz hamulcowych, w których jedna z nich na 10 zestawów kołowych osiąga kresowe maksymalne zużycie względem kół, których zużycie nie osiągnęło $\frac{3}{4}$ zużycia dopuszczalnego. Stwierdzono to w 4 analizowanych pojazdach. Taka sytuacja nie występuje w pojazdach z hamulcem klockowym opisanych w rozdziale 3 (pojazdy EN97).

Z przeprowadzonych analiz na grupie tych samych pojazdów stwierdzono, że:

- 4) Zużycia na średnicy tocznej zestawów kołowych napędnych (skrajnych wózków) są większe niż na środkowych zestawach tocznych. W przypadku tarcz hamulcowych sytuacja jest odwrotna, na wózkach tocznych zużycie jest większe niż na wózkach napędnych. Wynika to z faktu, że wózki toczne hamowane są tylko hamulcem ciernym, a wózki napędne hamulcem elektrodynamicznym i jedynie w ostatniej fazie hamowania dodatkowo hamulcem ciernym. W odniesieniu do zestawów kołowych, które jako skrajne pierwsze nabiegają na szynę podczas jazdy w łuku oraz fakt rozruchu, zużycia na okręgu tocznym są większe w stosunku do zestawów tocznych.
- 5) Obserwacja wymiaru maksymalnej i minimalnej średnicy koła oraz grubości tarcz hamulcowych podczas okresowych przeglądów $P2$ pozwala na tworzenie rozkładów częstości względnej wstępowania wymiarów max i min na poszczególnych zestawach kołowych. Pozwala to na lepszą i szybszą wizualizację, a pośrednio również informuje o szybkości zużycia kół i tarcz hamulcowych.
- 6) Regresyjnymi modelami liniowymi jak i nieliniowymi możliwe jest modelowanie zarówno zmiany parametrów koła w funkcji przebiegu (lub czasu) jak również zużycia, a kryterium doboru modelu wynika z najwyższej wartości współczynnika determinacji.
- 7) Zmiany na średnicy kół zestawów kołowych jak i zużycie kół najlepiej opisywać modelem regresyjnym modelem kwadratowym. Natomiast w przypadku tarcz hamulcowych zmiany grubości jak i ich zużycie może być opisane regresyjnym modelem liniowym w funkcji przebiegu pojazdu.
- 8) Określenie przybliżonego przebiegu jaki uzyskałby zestaw kołowy przy jego użytkowaniu do kresowego wymiaru można przeprowadzić zarówno modelem zmiany parametru w funkcji przebiegu lub modelem zużycia. W przypadku średnicy kół różnice między uzyskanymi wartościami przebiegów nie przekraczają 1%. Natomiast w przypadku tarcz hamulcowych oszacowane wartości przebiegów różnią się między sobą o około 13%.
- 9) Z praktycznego punktu, model bazujący na wynikach zmiany danego parametru uzyskiwanego z przeglądu $P2$ jest mniej pracochłonny od modelu zużycia, wyniki przebiegu otrzymuje się szybciej przy mniejszej liczby działań matematycznych.

5. SFORMUŁOWANIE WŁASNEJ PROBLEMATYKI BADAWCZEJ

5.1. Przesłanki naukowo-badawcze własnej problematyki

Badania rozpoznawcze przeprowadzone na elektrycznych zespołach trakcyjnych serii EN97 i EN76 dowodzą o nierównomiernym zużyciu zestawów kołowych, co stwierdzono podczas przeglądów okresowych na wszystkich pojazdach eksploatowanych u przewoźników od nowości. Na podstawie tych badań jednoznacznie stwierdzono, że zestaw kołowy najszybciej zużywał się na średnicy koła D , co przyspieszało przetoczenie kół. W przypadku pojazdu EN76 na drugim miejscu należy wskazać stromość obrzeża qR . Udział procentowy przekroczonych parametrów zestawu kołowego wyniósł 43,5% dla średnicy koła, 33,5% dla stromości obrzeża i 23% łącznie dla pozostałych parametrów ZK (Og, Ow, Ogl+Ogp, Ez i Az). Stwierdzono to na podstawie ponad 7,5 tysiąca pomiarów zapisanych w kartach parametrów geometrycznych zestawów kołowych zapisywanych podczas przeglądu okresowego wykonywanego co 12000 km lub co 30 dni. W kilku (nielicznych) przypadkach, stwierdzano wady powierzchniowe na powierzchni tocznej, które przyspieszały proces przetoczenia kół na wymiar mniejszy, co skracало żywotność eksploatacyjną zestawów kołowych. Badania rozpoznawcze na pojazdach EN97 dowiodły, że na przyspieszone zużycie kół zestawów kołowych wymuszające przetoczenie profilu koła ma wpływ szereg następujących czynników:

1. Lokalizacji zestawu kołowego w wózku oraz na pojeździe,
2. Techniki jazdy maszynisty z uwzględnieniem sposobu hamowania (udział hamulca ciernego PN do hamulca elektrodynamicznego),
3. Charakterystyka linii kolejowej w rozumieniu pochyleń pionowych, promieni łuków oraz stanu torowiska,
4. Przypadki losowe związane z występowaniem wad powierzchniowych na powierzchni tocznej kół (rzadko występujące).

W przypadku pojazdu EN76 nierównomierność zużycia zestawów kołowych dodatkowo wynikał z zamocowanych do koła tarcz hamulcowych. Badania rozpoznawcze dla tej grupy pojazdów wykazały, że intensywność zużycia tarcz hamulcowych była znacznie większa względem kół na średnicy tocznej D . Tarcze hamulcowe szybciej osiągały kresowe zużycie niż średnic koła. Zważywszy, że tarcze zamocowane były do kół z dwóch stron, szybsze zużycie tarcz wymuszało demontaż zestawu kołowego z wózka i wyciśnięcie jednego z kół z osi zestawu kołowego. Ponowny montaż koła na oś nie zawsze był możliwy ze względu na zarysowanie powierzchni osadzenia koła na osi, co w wielu przypadkach wymuszało montaż nowych kół.

Zestaw kołowy podobnie jak ślizgi odbieraków prądu to jedyne zespoły, które stykają się z elementami infrastruktury kolejowej jak szyny kolejowe czy przewody trakcyjne. Stąd zrozumiałe jest, że w tych zespołach występuje zjawisko zużycia ciernego, co wymaga okresowej kontroli ich stanu technicznego. W literaturze kolejowej tematyka zestawów kołowych analizowana jest wielopłaszczyznowo i podzielona na grupy. Pierwszą grupę stanowią artykuły poruszające zagadnienia zużycia ciernego opisane w pracach [25, 41, 46, 62, 70, 71, 140], w drugiej grupie znajdują się prace dotyczące warstwy wierzchniej materiału kół zestawów kołowych (prace [1, 31, 102, 120, 129]). W trzeciej grupie należy wskazać prace związane z szeroko rozumianymi modelami tarcia jak np. [4, 25, 32, 51, 66]. W czwartej grupie autorzy poruszają zagadnienia związane z poślizgiem kół i przyczepnością kół do szyn przy obliczeniach trakcyjnych lokomotyw czy innych pojazdów trakcyjnych, prace [18, 35, 54]. Piątą grupę prac naukowych stanowią zagadnienia związane z bezpieczeństwem przed wykolejeniem (zależność Y/Q) jak np. [6, 19, 37, 97, 98]. Ostatnią grupę stanowią prace związane obsługą i utrzymaniem układu biegowego w rozumieniu systemów eksploatacji czy

strategii eksploatacji. Mimo, że jest to również liczna grupa artykułów jak np. [47, 58, 76, 69, 82, 83, 87, 91, 92, 139], jednak są to głównie prace teoretyczne z nieliczną grupą badawczych popartych konkretnymi przykładami zastosowań jak np. [45, 84, 131].

W warunkach eksploatacyjnych na przykładzie pojazdów szynowych, intensywność zużycia zestawów kołowych jest uzależniona od wielu czynników. Sprawia to, że zużycie występujące w styku koła z szyną nie daje się opisać jedną matematyczną zależnością uwzględniającą wszystkie czynniki jak proces tarcia, stan torowiska, styl jazdy, udział hamulca ciernego klockowego, profil trasy czy przypadki losowe związane z wadami materiałowymi koła kolejowego. Na podstawie przeglądu literaturowego oraz badań rozpoznawczych stwierdza się, że stan powierzchni kół w rozumieniu parametrów geometrycznych opisujących profil koła powinien być nie tylko rejestrowany i archiwizowany na odpowiednich kartach ale również na bieżąco analizowany. Wspomniana analiza pozwoliłaby na proces prognozowania czasu lub przebiegu przekroczenia danego parametru jak również pośrednio wpłynęłaby na poprawę bezpieczeństwa i wyeliminowanie przypadków ewentualnego uszkodzenia prowadzącego do zdarzenia lub wypadku kolejowego.



Rys. 4.1 Wypadek kolejowy w Eschede w dniu 3 czerwca 1998 r., a) widok pociągu Inter-Express ICE 884, b) widok zestawu kołowego w dniu wypadku [103, 104]

Przykładem takim był wypadek kolejowy pod Eschede pociągu Intercity-Express ICE 884 „Wilhelm Conrad Röntgen“ relacji Monachium-Hamburg, który miał miejsce 3 czerwca 1998 r. w Dolnej Saksonii, w którym zginęło 101 osób. Przyczyną tego wypadku była pęknięta obręcz która uszkodziła zwrotnice kolejową, przez co drugi wózek trzeciego wagonu wjechał na tor zwrotny, a wagon uderzył w podporę wiaduktu [105]. Po tym zdarzeniu bezwzględnie zakazano używania kół obręczowanych z wkładami elastycznymi w pociągach pasażerskich i towarowych kursujących z prędkością powyżej 120 km/h na rzecz kół monoblokowych. Jako przyczynę wypadku oficjalnie podano pęknięcie zmęczeniowe koła w wyniku złej konstrukcji koła oraz błędów w procesie utrzymania wagonu gdyż intensywność zużycia koła przed ostatnim przeglądem poprzedzającym wypadek była większa względem poprzednich okresów. Na tej podstawie już po wypadku prognozowano, że obręcz koła szybciej osiągnie wymiar kresowego zużycia niż kolejny planowany przegląd okresowy. W wyniku braku jednoznacznych przyczyn, dowodów potwierdzających postawione hipotezy przyczyn wypadku umorzono sprawę bez orzekania o winie.

Pomijając kwestie związane z poprawą bezpieczeństwa na kolei a uwzględniając zagadnienia techniczne, organizacyjne i ekonomiczne, temat pracy również podyktowany jest przez:

1. Bardzo długi okres dostawy od chwili złożenia zamówienia na zespoły i części pojazdów szynowych. W szczególności dotyczy to zamówień jednostkowych jak np. pojedynczy zestaw kołowy, w którym czas oczekiwania może wynieść nawet pół roku.

2. Długi okres oczekiwania za zamówieniem zestawu kołowego wydłuża okres wyłączenia pojazdu szynowego lub wagonu z użytkowania i nie uwzględniania go w ruchu planowym. W konsekwencji powoduje to wyłączenie pojazdu (wagonu) z systemu elektronicznego związanego z zakupem biletu i utrata korzyści finansowych u przewoźnika kolejowego.
3. Szeregowa struktura trwałości zestawu kołowego, w którym zużycie jednego elementu wymusza wymianę całego zestawu przy zdalnych stanach pozostałych jego części. Przykładem jest tarcza hamulcowa zamocowana z dwóch stron koła, której maksymalne zużycie wymusza demontaż całego zestawu kołowego przy nieużytych powierzchniach tocznych kół kolejowych.
4. Maksymalne wykorzystanie takich zespołów pojazdu szynowego jak zestaw kołowy do osiągnięcia wymiaru kresowego na średnicy kół zbieżnym z planowanym czasem naprawy rewizyjnej wymuszającej wymianę zestawu kołowego na nowy.
5. Sumaryczne skrócenie czasu wyłączenia pojazdu z użytkowania związanego z naprawą zestawu kołowego w rozumieniu jego przetoczenia na kolejny wymiar naprawczy na tokarce podtorowej lub wywiązania go z ramy wózka i skierowania na przetoczenie na tokarce do zestawów kołowych.

5.2. Teza i cel pracy

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy w obszarze zużycia kół kolejowych, procesów obsługowo-naprawczych pojazdów szynowych oraz wyników badań rozpoznawczych, uzyskano przesłanki pozwalające określić własną problematykę badawczą oraz sformułować następującą tezę rozprawy doktorskiej:

Możliwe jest wydłużenie czasu użytkowania i wydłużenie przebiegu pojazdu szynowego poprzez odpowiednie zarządzanie zestawami kołowymi w systemie ich eksploatacji oparte o wybrane charakterystyki ich zużycia.

W pracy doktorskiej planuje się ze względu na autorską koncepcję uwzględniającą zjawisko zużycia zestawów kołowych w obszarze kół i tarcz hamulcowych zarządzanie zestawami kołowymi dla wydłużenia czasu użytkowania pojazdu.

W ramach realizacji pracy doktorskiej wyznaczono cele naukowe i użyteczne. Cele naukowe to:

1. ***Wyznaczenie charakterystyk zużyciowych zestawów kołowych przy znanych warunkach brzegowych,***
2. ***Opracowanie modeli do oceny stanu zestawów kołowych pojazdu szynowego.***

Cele użyteczne to:

1. ***Opracowanie metodyki oceny zestawów kołowych w procesie eksploatacji pojazdów szynowych,***
2. ***Opracowanie algorytmów obsługowych dla zarządzania zestawami kołowymi w celu wydłużenia czasu użytkowania pojazdów szynowych.***

Realizacja postawionych celów naukowych i użytecznych wymaga:

1. Wyznaczenia zależności między parametrami geometrycznymi opisującymi profil zestawu kołowego w zależności od przebiegu pojazdu.
2. Wyznaczenie zależności między grubością tarcz hamulcowych wybranych pojazdów szynowych od ich przebiegu.
3. Zastosowanie regresyjnych modeli diagnostycznych zmiany średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych do prognozowania przebiegu pojazdu szynowego.

4. Zastosowanie regresyjnych modeli diagnostycznych zużycia średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych do prognozowania przebiegu pojazdu szynowego.
5. Opracowania koncepcji zarządzania zestawami kołowymi w procesie ich obsługi w celu wydłużenia czasu użytkowania pojazdu i wydłużenia przebiegu pojazdu.
6. Opracowania strategii obsługi pojazdów szynowych w zakresie zarządzania zestawami kołowymi w procesie ich utrzymania dla wydłużenia czasu użytkowania.
7. Zastosowanie regresyjnych modeli diagnostycznych zmiany średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych dla każdej analizowanej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi do prognozowania czasu użytkowania pojazdu szynowego.
8. Zastosowanie regresyjnych modeli diagnostycznych zmiany średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych dla każdej analizowanej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi do prognozowania przebiegu pojazdu szynowego.

5.3. Zadania niezbędne do osiągnięcia celu pracy

Do realizacji postawionego celu pracy doktorskiej wyznaczono następujące zadania badawcze, które zrealizowano w wyniku badań rozpoznawczych do dalszych analiz związanych z proponowanymi koncepcjami zarządzania zestawami kołowymi w procesie ich obsługi.

1. Badania rozpoznawcze dla pojazdów EN97:
 - analiza wyników pomiarów geometrycznych zestawu kołowego dla oceny wszystkich parametrów opisujących profil koła i zestaw kołowy w zakresie przypadków ich przekroczenia od wymagań stawianych w dokumentacji systemu utrzymania,
 - wyznaczenie zależności między zmianą średnicy koła w okręgu tocznym zestawu kołowego od przebiegu elektrycznego zespołu trakcyjnego serii EN97,
 - wyznaczenie zależności zużycia kół zestawów kołowych w funkcji przebiegu EZT EN97 z uwzględnieniem okresów związanych z koniecznością przetoczenia kół na tokarce do zestawów kołowych.
2. Badania rozpoznawcze dla pojazdów EN76:
 - wyznaczenie zależności między średnicą kół w okręgu tocznym i grubością tarcz hamulcowych w funkcji przebiegu pojazdów serii EN76 do pierwszej naprawy rewizyjnej,
 - wyznaczenie charakterystyk zużycia kół na ich średnicy i tarcz hamulcowych dla zestawów kołowych analizowanych elektrycznych zespołów trakcyjnych,
 - modelowanie zmiany średnicy kół i grubości tarcz hamulcowych w funkcji przebiegu pojazdu,
 - modelowanie zużycia kół i tarcz hamulcowych w funkcji przebiegu pojazdu.
3. Badania dodatkowe nad zastosowaniem koncepcji na kolejnych pojazdach EN57AL w celu sprawdzenia założeń wynikających z celów naukowych i użytkowych oraz postawionej tezy.

6. KONCEPCJE ZARZĄDZANIA ZESTAWAMI KOŁOWYMI

6.1. Wprowadzenie do koncepcji zarządzania zestawami kołowymi

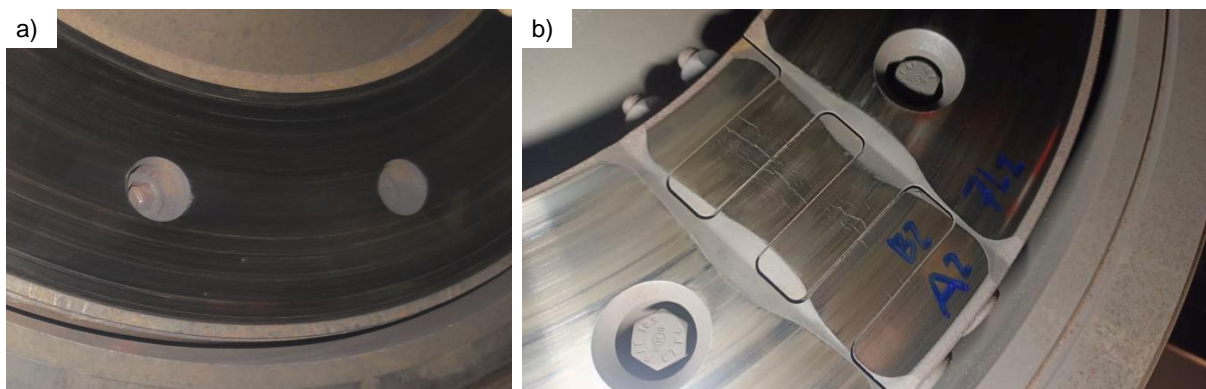
Zagadnienie zarządzania zestawami kołowymi w elektrycznych zespołach trakcyjnych wynika z postawionej funkcji celu tj. maksymalnego wydłużenie czasu użytkowania kół kolejowych z zamocowanymi tarczami hamulcowy, co przedstawia zależność (6.1). Wydłużony czas t_u również pośrednio przełoży się na dłuższy przebieg pojazdu p_m .

$$FC = \max t_u(D, T) \quad (6.1)$$

$$FC = \max p_m \quad (6.2)$$

gdzie: t_u – czas użytkowania kół $t_u(D)$ i tarcz hamulcowych $t_u(T)$,
 p_m – przebieg pojazdu w kilometrach.

Na podstawie badań rozpoznawczych na zestawach kołowych pojazdów serii EN76 zaobserwowano, że proces zużycia kół na średnicy w okręgu tocznym przebiega wolniej niż zużycie tarcz hamulcowych w rozumienia osiągnięcia kresowego dopuszczalnego wymiary D względem T . Stwierdzono, że jedna lub kilka par tarcz hamulcowych osiąga szybciej wymiar kresowego zużycia niż średnica kół. Zdarzały się przypadki wymiaru kresowego tarcz jeszcze przed planowanym przeglądem $P4$ (naprawy głównej). Od początku produkcji pojazdów serii EN76 na kołach zestawu kołowego mocowane były z dwóch stron pełne tarcze hamulcowe. Większa intensywność zużycia tarcz sprawia, że w celu wymiany ich na nowe konieczny jest demontaż zestawu kołowego z wózka i wyciśnięcie jednego z kół osi aby możliwa była wymiana tarcz znajdujących się od wewnętrznych stron kół. Ten zabieg (wyciśnięcie i ponowne wciśnięcie) może spowodować zarysowanie powierzchni podpiaścia osi i zdyskwalifikowania koła z dalszego użycia mimo nie przekroczonych parametrów geometrycznych profilu koła. W przypadku osi konieczne jest jej szlifowania na mniejszy wymiar, co wiąże się z zakupem kolejnego koła z mniejszym otworem średnicy podpiaścia. W przypadku kół zestawów napędnych jest to bardziej kosztowne niż w przypadku zestawów tocznych. Spowolnienie proces zużycia tarcz hamulcowych wpłynie na zminimalizowanie liczby przypadków wyciskania kół z osi i ryzyka zarysowania osi na powierzchni podpiaścia. Kwestia związana z wyciskaniem kół z osi dla wymiany tarcz hamulcowych znajdujących się od wewnętrznej strony kół została rozwiązana przejściem w trakcie realizacji niniejszej pracy doktorskiej na tarcze dzielone, co przedstawia rysunek 6.1.



Rys. 6.1. Widok tarczy hamulcowej z elektrycznego zespołu trakcyjnego EN76, a) pełnej (starsze rozwiązanie), b) dzielonej (widok na sposób łączenia segmentów) [fot. A.M. Rilo Cañas]

Miało to miejsce w roku 2020, kiedy właściciele i przewoźnicy elektrycznych zespołów trakcyjnych EN76 Pesa Elf zgłaszali producentowi potrzebę takiego działania, ze względu na szybsze zużycie tarcz hamulcowych względem kół kolejowych, co na poziomie utrzymania

pojazdów w ciągłej sprawności generowało dużą pracochłonność związaną z wymianą tarcz na nowe i możliwością uszkodzenia osi. Zebrane doświadczenie z eksploatacji pojazdów od roku 2012 kiedy kierowane były do ruchu planowego dostawca układu hamulcowego wprowadził na rynek tarcze dzielone.

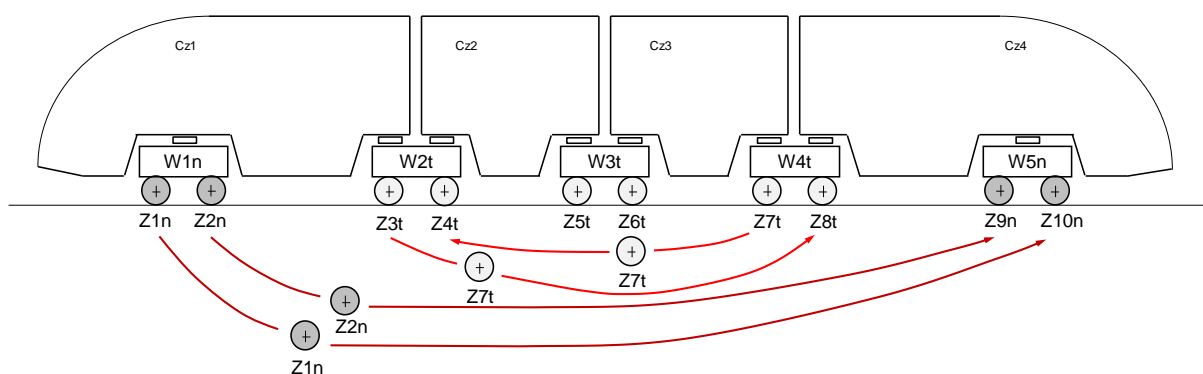
Przejście na tarcze dzielone pozwala na uniezależnienie wpływu przyspieszonego zużycia tarcz hamulcowych na działania związane z wymianą kół. Dzięki temu możliwe jest zdefiniowanie dwóch niezależnych funkcji celu dla maksymalnego wydłużenia czasu użytkowania tarcz hamulcowych do przeglądu P4 (do okresu 5 lat) oraz kół kolejowych w taki sposób aby możliwe było uzyskanie przebiegu 1000000 km w przypadku wydłużonego okresu skierowania pojazdu na naprawę rewizyjną (po 6 lub po 8 latach).

Funkcja celu zgodnie z [88] to zależność matematyczna pozwalająca na wyznaczenie wartości maksymalnej lub minimalnej analizowanego parametru lub wielkości. Jej zastosowanie jest bardzo szerokie, w ujęciu matematycznym służy do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych. W naukach ekonomicznych funkcja celu służy do modelowania zachowania konsumentów czy producentów. W informatyce jest szeroko stosowana w algorytmach optymalizacyjnych jak algorytmy genetyczne czy ewolucyjne [43]. W technice funkcja celu to dążenie do uzyskania wartości minimalnej lub maksymalnej danej wielkości jak np. czasu jazdy czy zużycia (funkcja minimum) lub przebiegu pojazdu czy wydajność w przypadku funkcji maksimum. Według pracy [124] funkcja celu to wyrażenie matematyczne sprawdzające poprawność działania danego systemu lub algorytmu w realizacji postawionego celu na podstawie określonych kryteriów. Dlatego funkcja celu jest powszechnym i ważnym narzędziem wykorzystywanym w wielu dziedzinach nauki przy określeniu optymalnego rozwiązania danego zagadnienia lub problemu w zakresie minimalizacji lub maksymalizacji jego wartości.

W kolejnych podrozdziałach zgodnie z postawioną funkcją celu związaną z wydłużeniem czasu użytkowania, a tym przebiegiem pojazdu, na podstawie 4 zaproponowanych koncepcji związanych z zamianą miejscami poszczególnych zestawów kołowych lub wózków – sprawdzono jakie są możliwe wydłużenia czasu i przebiegu pojazdu bez ingerencji w fizyczną przyczynę nierównomiernego zużycia kół i tarcz na poszczególnych zestawach kołowych.

6.1.1. Koncepcja zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe ZZWP

Pierwszą analizowaną koncepcją zarządzania zestawami kołowymi jest propozycja zamiany (migracji) zestawów kołowych w całym pojeździe. Obiektem badań były elektryczne zespoły trakcyjne serii EN76 opisane szczegółowo w rozdziale 5 podczas analizy zużycia zestawów kołowych na średnicy kół oraz zużycia tarcz hamulcowych na ich grubości. Głównym założeniem koncepcji zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe jest możliwość, po podniesieniu wszystkich członów pojazdu na podnośnikach i wytoczeniu wózków, demontażu zestawów kołowych z miejsca o największym zużyciu kół lub tarcz i ponowny montaż do miejsca na wózku o najmniejszym zużyciu. Na rysunku 6.1 przedstawiono schemat założenia koncepcji migracji zestawów kołowych.

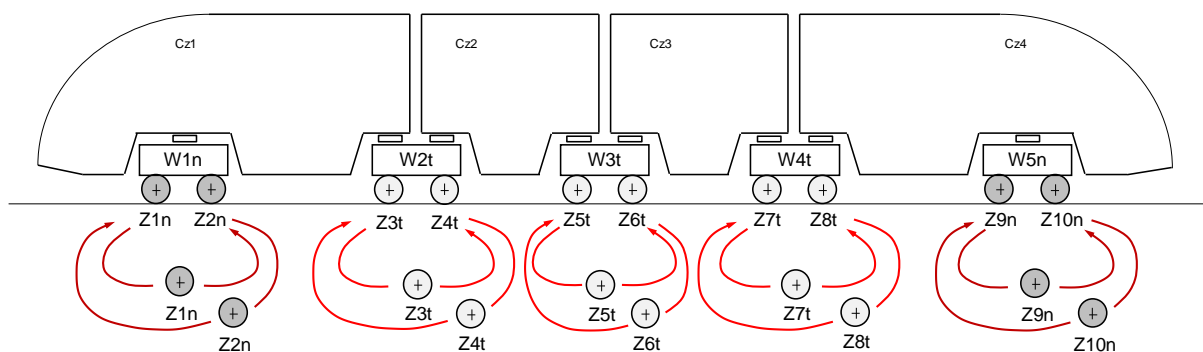


Rys. 6.2. Schemat koncepcji migracji zestawów kołowych w całym pojeździe (ZZWP)

Wybór miejsca montażu zestawu kołowego poprzedzony jest analizą zużycia zestawów kołowych z okresów poprzedzających zamianę z wcześniejszych przeglądów okresowych P2 podczas których dokonywano pomiaru parametrów geometrycznych profilu koła oraz grubości tarcz hamulcowych. Jedynym ograniczeniem tej koncepcji w zakresie zarządzania zestawami kołowymi na pojeździe jest możliwość przekładania zestawów w ramach ich przeznaczenia. Oznacza to, że zestawy napędne mogą być zamiennie montowane tylko na wózkach 1 i 5 (3 nowe lokalizacje). Natomiast zestawy toczne mogą być przekładane między wózkami 2, 3 i 4 (6 pozycji zamiany).

6.1.2. Koncepcja zamiany zestawów kołowych w wózku ZZWW

Druga koncepcja zarządzania zestawami kołowymi polega na demontażu zestawów kołowych z wózka tocznego lub napędnego i ponowny montaż w miejscach poprzedniego zestawu kołowego. W tej koncepcji zamianę zestawów kołowych w wózku można przeprowadzić na dwa sposoby. Pierwszy z wykorzystaniem windy (tzw. zapadni) w kanale rewizyjnym z fragmentem torowiska dla opuszczenia wózka po jego wcześniejszym wywiązaniu z nadwozia pojazdu. Następnie zamianę zestawów kołowych na sąsiednim torze z wykorzystaniem suwnicy lub innych podnośników dla uniesienia wózka. Ostatnią czynnością (operacją) jest ponowny montaż wózka w pojeździe z wykorzystaniem windy w kanale rewizyjnym. Zważywszy, że zakłady naprawcze posiadają ograniczoną liczbę zapadni konieczne jest przemieszczenie pojazdu aby kolejny wózek wjechał na platformę z torowiskiem do jego opuszczenia. Na rysunku 6.3 przedstawiono schemat koncepcji zamiany zestawów kołowych w wózku.



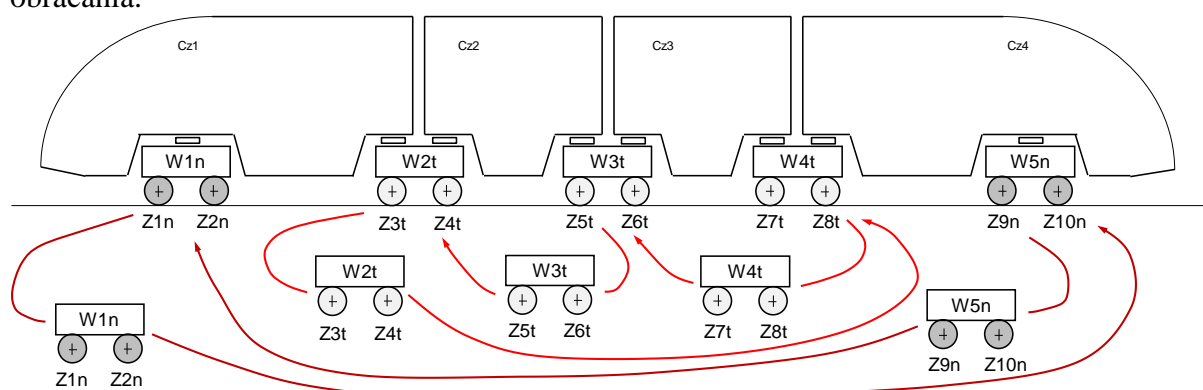
Rys. 6.3. Schemat koncepcji zamiany zestawów kołowych w wózku (ZZWW)

Drugim sposobem realizacji tej koncepcji jest podniesienie wszystkich członów elektrycznego zespołu trakcyjnego na podnośnikach po wcześniejszym demontażu ich z nadwozia pojazdu, odłączenie instalacji pneumatycznej i elektrycznej do silników trakcyjnych

w przypadku wózków napędnych. Następnie wytoczenie wózków na sąsiedni lub inny tor w celu uniesienia ich na podnośnikach w celu demontażu zestawów kołowych i ponownego ich montażu w miejscach po wcześniejszym zestawie kołowym. Ostatnim etapem prac przy tej koncepcji jest ponowne wtoczenie zestawów kołowych pod pojazd, opuszczenie wszystkich członów zespołu trakcyjnego, mechaniczny montaż wózków na nadwoziem i wykonie wszystkich połączeń pneumatycznych i elektrycznych.

6.1.3. Koncepcja zamiany wózków bez obracania ZWBO

Trzecia koncepcja zarządzania zestawami kołowymi polega na zamianie wózków w pojeździe. W tej koncepcji również wymagane jest uniesienie całego pojazdu w celu demontażu wózków i ich wytoczenie spod pojazdu. Następnie wózki są ponownie wtoczone pod pojazd i zamocowane w innych miejscach niż miało to miejsce przed demontażem. Ocenę nowej lokalizacji montażu wózka na czopach skrętowych przeprowadza się również na podstawie wcześniejszych pomiarów parametrów geometrycznych profilu koła lub tarcz hamulcowych. Te wózki, które w kolejnych pomiarach w czasie przeglądów *P2* cechowały się największym zużyciem kół (na średnicy koła lub grubości tarcz) są kierowane w nowe lokalizacje pod pojazdem gdzie występowało najmniejsze zużycie parametru *D* lub *T*. Na rysunku 6.4 przedstawiono schematycznie założenia koncepcji migracji wózków bez obracania.

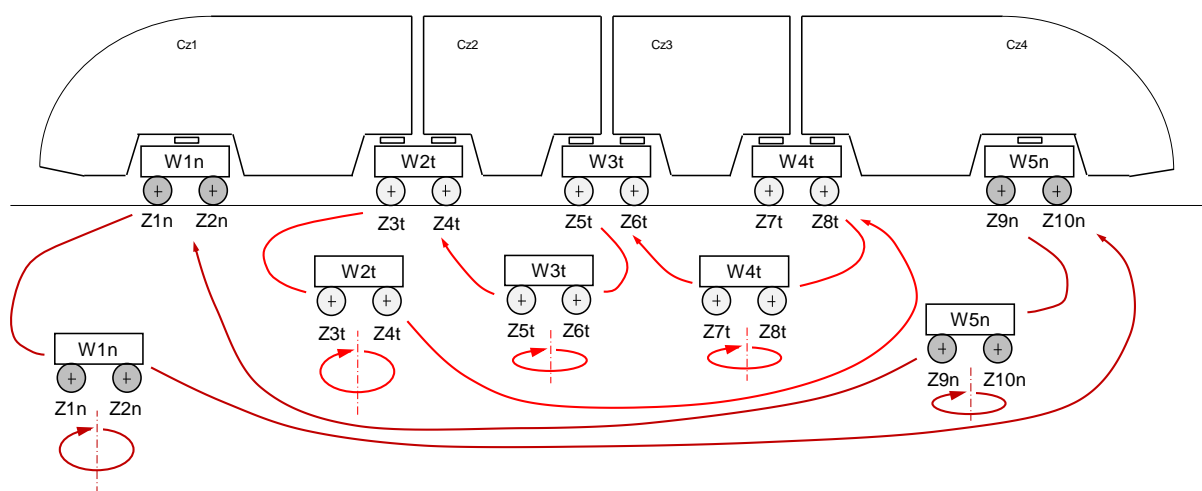


Rys. 6.4. Schemat koncepcji zamiany wózków bez obracania (ZWBO)

Należy podkreślić, że migrację (zamianę) wózków prowadzi się osobno dla wózków napędnych i osobno dla wózków tocznych. W przypadku wózków napędnych możliwe są dwie koncepcje, w pierwszej wózek pozostaje pod pojazdem, natomiast w drugiej wózek pierwszy zastąpiony jest z ostatnim (piątym) wózkiem.

6.1.4. Koncepcja zamiany wózków z obracaniem ZWZO

Czwarta koncepcja zarządzania zestawami przez migrację wózków jest w swoich założeniach rozwinięciem koncepcji trzeciej (ZWBO). Zarówno w ZWBO i czwartej koncepcji (ZWZO) spod pojazdu po jego wcześniejszym uniesieniu jest demontaż i wytoczenie wózków z ponownym ich montażem w innym miejscu pod pojazdem. Dodatkowo w koncepcji zamiany wózków z obracaniem zakłada się możliwość obrócenia wózka o 180° aby zestaw kołowy przedni znalazł się po przeciwnej stronie. Wózki z zestawami kołowymi o największym zużyciu kierowane są pod pojazd w miejsc wózków o najmniejszym zużyciu kół na średnicy tocznej lub najmniejszym zużyciu tarcz hamulcowych. Na rysunku 6.5 przedstawiono założenie tej koncepcji.



Rys. 6.5. Schemat koncepcji zamiany wózków z obracaniem (ZWZO)

Koncepcje z zamianą wózków z jednoczesnym ich obrotem należy traktować jako propozycję do pogłębionej dalszej analizy. Na etapie redakcji pracy doktorskiej możliwa jest ocena zasadności tej koncepcji w ujęciu teoretycznym. Jednak bazując na stanie techniki w zakresie konstrukcji wózków pojazdów szynowych, nie jest możliwe stwierdzenie, że wszystkie wózki mogą być obracane o 180° . W większości rozwiązań kolejowych wózków tocznych jest to możliwe, jednak w przypadku wózków napędzonych nie jest to możliwe. W szczególności dotyczy to wózków skrajnych zespołów trakcyjnych, które w okolicach jednej z czołownic zamocowane mają zgarniacze lub inne urządzenia jak układy do smarowania obrzeża kół.

6.2. Warunki brzegowe koncepcji zarządzania zestawami kołowymi

Wszystkie 4 koncepcje zarządzania zestawami kołowymi opisane w podrozdziałach 6.1.1-6.1.4 zostaną odniesione do wyników zużycia kół na średnicy tocznej oraz zużycia tarcz hamulcowych na ich grubości z uwzględnieniem wartości przetoczeń zestawów kołowych w celu odnowienia powierzchni profilu tocznego oraz profilu tarczy hamulcowej. Zebrane wyniki z pomiarów geometrycznych wybranego zespołu trakcyjnego EN76 zostały przeliczone na wartości zużycia z okresu przekazania pojazdu od producenta, przewoźnikowi kolejowemu w dniu 08.08.2012 r. do ostatniego przeglądu okresowego *P2* w dniu 27.05.2019 r. Należy podkreślić, że pojazd miał planowany przegląd *P4* (naprawę rewizyjną) na 30.03.2018 r., jednak zmianą zapisu w dokumentacji systemu utrzymania DSU, wspomniany przegląd *P4* został przesunięty na kolejny rok. Spowodowało to, że przegląd *P4* nie odbył się po 5 latach, a po 6 latach. W tabeli 6.1 przedstawiono w milimetrach wyniki zsumowanego zużycia kół pojazdu między okresami przetoczeń zestawu kołowego z uwzględnieniem wartości grubości warstwy skrawanej podczas toczenia profilu kół (tzw. reprofilacja kół). W okresie 6 lat w odniesieniu do pomiarów średnicy koła wykonano 39 przeglądów *P2* oraz 6 przetoczeń profilu koła.

W zakresie tarcz hamulcowych wykonano 33 przeglądy okresowe pomiędzy którymi odbyły się 2 przetoczenia tarcz hamulcowych ze względu na niespełnienie wymagań DSU w zakresie m.in. występującej falistości powierzchni czy drobnych pęknięć i wykruszeń. Ze względu na osiągnięcie w niektórych tarczach hamulcowych kresowego wymiaru wynoszącego 125 mm, tarcze zostały wymienione na nowe w czasie przeglądu *P4* po 5 latach użytkowania pojazdu. W tabeli 6.2 przedstawiono w milimetrach wyniki zsumowanego zużycia tarcz hamulcowych zmierzonych podczas przeglądów *P2* pojazdu między okresami ich przetoczeń z uwzględnieniem wartości grubości warstwy skrawanej podczas toczenia tarcz hamulcowych w dwóch okresach.

Tab. 6.1. Wartości zsumowanego zużycia średnicy kół między toczeniem profilu koła wraz z wartościami grubości warstwy skrawanej dla poszczególnych kół elektrycznego zespołu trakcyjnego EN76

	Z ₁₋₁₂	T ₁	Z ₁₃₋₂₀	T ₂	Z ₂₁₋₂₂	T ₃	Z ₂₃₋₃₀	T ₄	Z ₃₁₋₃₄	T ₅	Z ₃₅₋₃₆	T ₆	Z ₃₇₋₃₉
Z1 NP	4,4	2	4,3	1,75	4,6	2	4,5	2,5	4,9	2,25	5,1	2,5	5,2
Z1 NL	4,3	1,75	4,4	2	4,5	1,5	4,3	2,75	5	2,5	4,8	2,25	5
Z2 NP	3,8	2	3,6	1,75	3,8	2,5	3,7	3	3,9	1,75	4	1,75	4,2
Z2 NL	3,6	1,75	3,7	2	3,9	1,75	3,6	3	4	1,5	3,8	2	4,1
Z3 TP	2,1	0	2,4	0,25	2	0,75	2,7	0,75	2,8	0,25	2,8	1,5	3
Z3 TL	2,3	0	2,3	0,5	2	1	2,6	1	2,7	0,25	2,9	1,5	3,1
Z4 TP	2,8	0	0,6	0,5	3,1	2	3,3	2,5	3,6	2,75	3,9	2	4,2
Z4 TL	2,9	0	0,8	0,75	3,2	1	3,5	3	3,2	2,75	4,1	2,25	4,4
Z5 TP	0,1	0	0,4	0,5	0,5	0,75	0,7	0,75	0,7	0,5	0,8	0,75	1,2
Z5 TL	0,2	0	0,3	0,25	0,4	0,5	0,6	0,75	0,7	0,75	0,9	1	1,4
Z6 TP	3,2	0	1,8	0,75	3,7	2	3,9	2,5	3,3	2,25	4,6	3,25	5,1
Z6 TL	3,4	0	0,8	0,5	3,8	1,75	4	2,75	3,4	2,75	4,7	3	5,3
Z7 TP	2,6	0	2,4	0,25	2,9	2	3,1	3,5	3,4	3,5	3,6	4,25	3,9
Z7 TL	2,7	0	2,4	0,25	3	2,5	3,2	3,5	3,5	3,5	3,7	4	3,8
Z8 TP	0,2	0	0,5	0	0,6	2,25	0,8	1,5	0,9	0,75	1,2	1	1,4
Z8 TL	0,4	0	0,6	0,5	0,7	2,25	0,8	1,25	1	0,25	1,3	1,25	1,6
Z9 NP.	4,6	2,25	4,5	2	4,8	1	4,9	1,5	5	1,25	5,2	1,5	5,4
Z9 NL	4,2	2	4,6	2,25	4,7	0,5	4,8	1,75	5,1	1,5	5,3	1,75	5,6
Z10 NP	6,9	2,5	4,8	2,25	6	1,75	6,9	2,25	7,3	1,75	7,5	1,5	7,6
Z10 NL	6,8	2,25	2,6	2	6,9	1,5	7	2,25	7,2	2	7,4	1,75	7,5
Z1 NP – prawe koło napędne zestawu kołowego nr 1, Z1 NL – lewe koło napędne zestawu kołowego nr 1, Z ₁₋₁₂ – suma zużycia średnicy koła zmierzona od pierwszego przeglądu P2 do dwunastego przeglądu P2 w [mm].	Z3 TP – prawe koło tocznego zestawu kołowego nr 3, Z3 TL – lewe koło tocznego zestawu kołowego nr 3, T ₁ – wartość grubości warstwy skrawanej podczas pierwszego toczenia koła w [mm].												

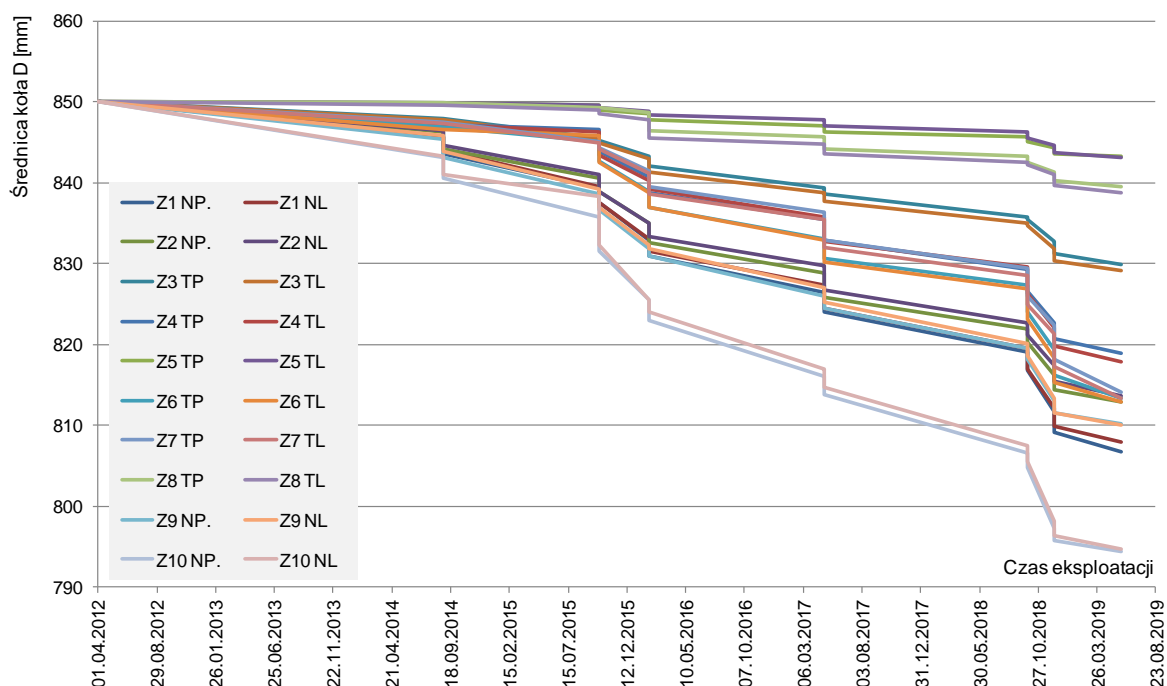
Tab. 6.2. Wartości zsumowanego zużycia tarcz hamulcowych między toczeniem profilu tarczy wraz z wartościami grubości warstwy skrawanej dla poszczególnych tarcz elektrycznego zespołu trakcyjnego EN76

	Z ₁₋₁₂	T ₁	Z ₁₃₋₂₅	T ₂	Z ₂₆₋₃₃
Z1 NP(T)	2,8	0,2	2,9	0,2	2,5
Z1 NL(T)	2,3	0,2	3,3	0,2	1,9
Z2 NP(T)	2,3	0,2	2,5	0,1	2,3
Z2 NL(T)	2,8	0,2	2,7	0,1	2,4
Z3 TP(T)	3,9	0,1	3,2	0	2,4
Z3 TL(T)	3,1	0,1	3,1	0	3,2
Z4 TP(T)	2,6	0,4	3,7	0,4	2,3
Z4 TL(T)	2,6	0,4	3,7	0,2	2
Z5 TP(T)	3,1	0,2	3	0,3	1,8
Z5 TL(T)	1,8	0,2	3,4	0,3	2,7
Z6 TP(T)	2,9	0,1	3,4	0,1	2,8
Z6 TL(T)	2,3	0,1	3,8	0,1	1,9
Z7 TP(T)	3,6	0,4	3	0,1	2,6
Z7 TL(T)	3,2	0,4	3,6	0,4	1,6
Z8 TP(T)	2,1	0,1	3,7	0,2	2,5
Z8 TL(T)	2,6	0,1	3,5	0,2	1,6
Z9 NP(T)	1,3	0,2	3,5	0,1	3,4
Z9 NL(T)	2,3	0,2	3,4	0,1	1,9
Z10 NP(T)	2,4	0,1	3,2	0,1	2,4
Z10 NL(T)	2,4	0,1	2,9	0,1	2,1
Z1 NP(T) – prawe tarcze napędne zestawu kołowego nr 1, Z1 NL(T) – lewe tarcze napędne zestawu kołowego nr 1, Z3 TP(T) – prawe tarcze tocznego zestawu kołowego nr 3, Z3 TL(T) – lewe tarcze tocznego zestawu kołowego nr 3, Z ₁₋₁₂ – suma zużycia tarcz hamulcowych zmierzona od pierwszego przeglądu P2 do dwunastego przeglądu P2 w [mm], T ₁ – wartość grubości warstwy skrawanej podczas pierwszego toczenia tarcz hamulcowych w [mm].					

Ocena zaproponowanych koncepcji w zakresie wydłużenia czasu użytkowania zestawu kołowego do osiągnięcia wymiaru kresowego zużycia kół na średnicy tocznej oraz grubości tarcz hamulcowych, opiera się na danych z kart pomiarowych wymiarów geometrycznych zestawu kołowego. Wspomnianą ocenę osobno przeprowadzono dla kół jak i tarcz hamulcowych. Chwilami czasowymi wykonania zamiany zestawu kołowego lub wózka będą okresy kiedy zestawy kołowe kierowane były na toczenie profilu koła i tarczy hamulcowej. Na podstawie danych z przeglądów okresowych dokonywano uszeregowania zestawów kołowych od wymiaru minimalnego dla średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej do wymiaru maksymalnego. Następnie po wykonanym przetoczeniu koła lub tarczy zestaw kołowy lub wózek z największym zużyciem D lub T montowany był w miejscu koła lub wózka o najmniejszym zużyciu. Proces ten wykonywano tak długo aż ostatni zestaw kołowy o najmniejszym zużyciu zamocowany był w miejscu o największym zużyciu koła lub tarczy hamulcowej.

6.3. Wyniki wartości średnicy kół po zarządzaniu zestawami kołowymi i wózkami

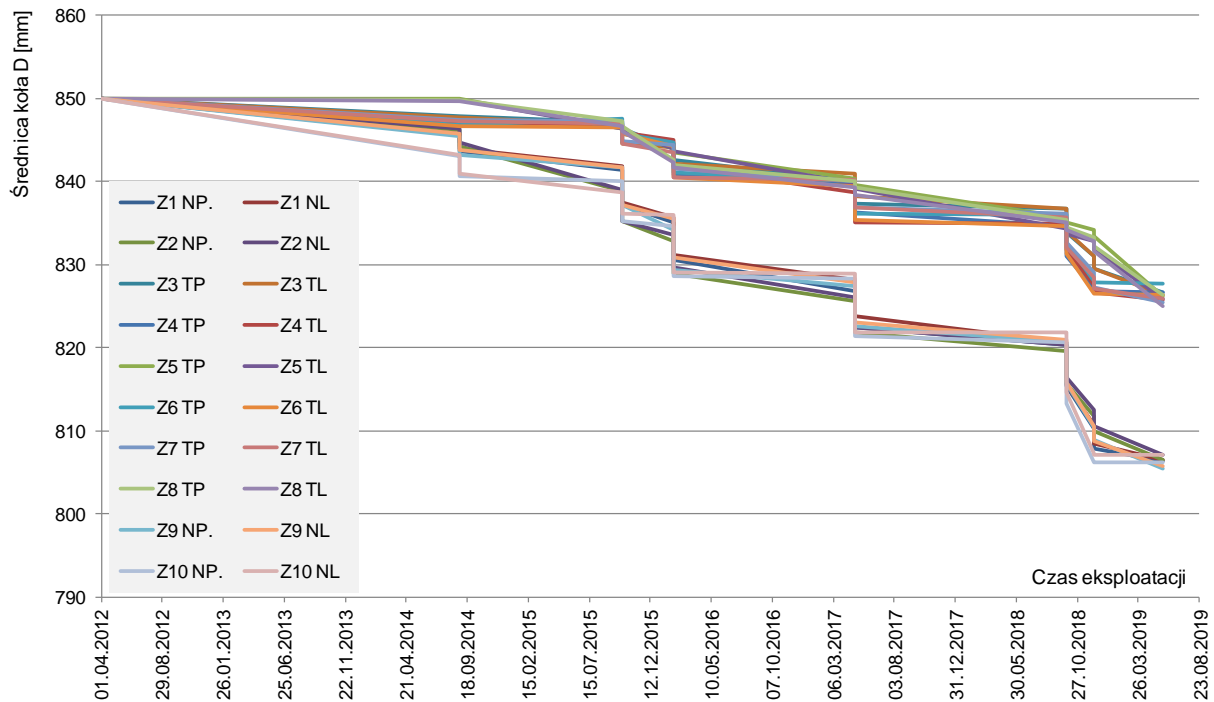
Dla zaproponowanych koncepcji na podstawie wyników zużyć na średnicy kół oraz wartości przetoczeń kół jaki uzyskał jeden z analizowanych pojazdów EN76 eksploatowany w okresie 5 lat z wydłużeniem o rok - dokonano modelowego wyznaczenie charakterystyk przebiegu średnicy kół w funkcji czasu. Na przykładowym rysunku 6.6 przedstawiono charakterystykę analizowanego pojazdu EN76, z którego zebrano dane o zużyciu kół oraz wartości przetoczeń kół, które zapisano wcześniej w tabeli 6.1. Na rysunku 6.6 nie zaznaczono wartości z poszczególnych średnic zarejestrowanych podczas przeglądów $P2$, tylko wartości średnic przed i po toczeniu zestawu kołowego.



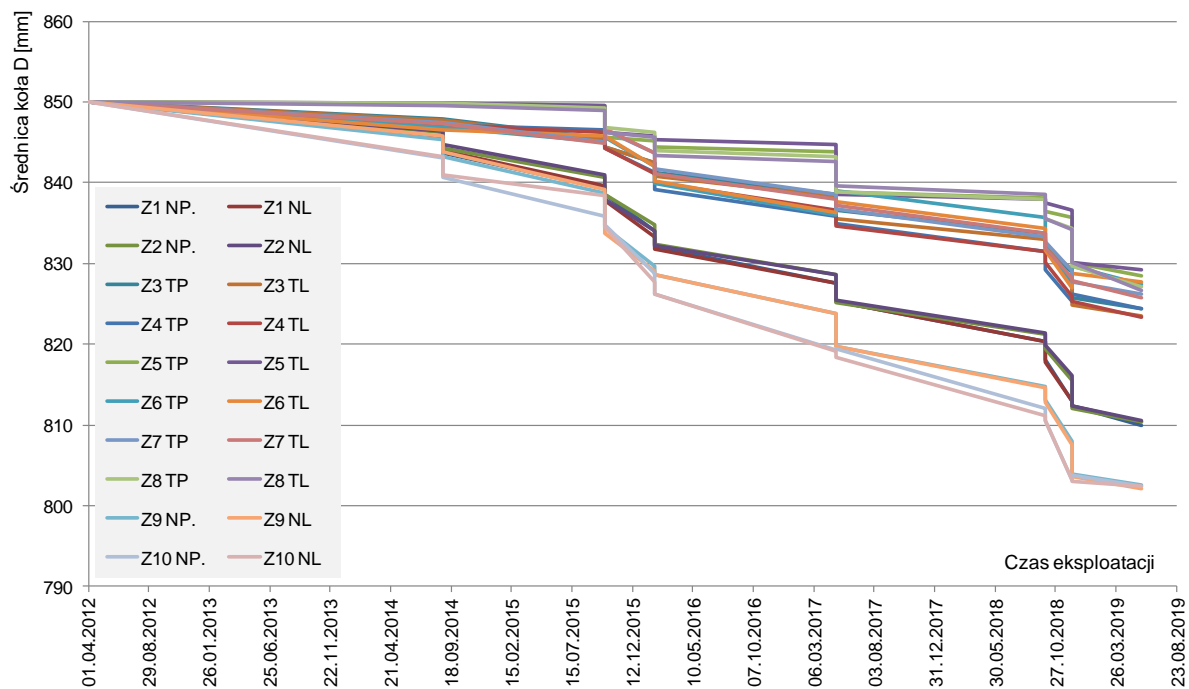
Rys. 6.6. Zależność średnicy kół od czasu eksploatacji dla klasycznego podejścia do utrzymania zestawów kołowych zgodnie z DSU w oparciu o zsumowane wartości zużycia kół i przetoczeń kół

Analizując rysunek 6.6 z wykresem zmiany średnicy kół pojazdu EN76 eksploatowanego w okresie od 01.04.2012 r. do 27.05.2019 r. stwierdza się, bardzo duży rozrzut wartości średnicy kół podczas ostatniego przeglądu $P2$. Wartości te znajdują się w zakresie od 843 do 794 mm. Potwierdza to potrzebę podjęcia takich działań aby rozrzut wartości średnicy kół był

mniejszy. Na rysunkach 6.7-6.10 przedstawiono modele charakterystyk średnicy kół w funkcji czasu po zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.



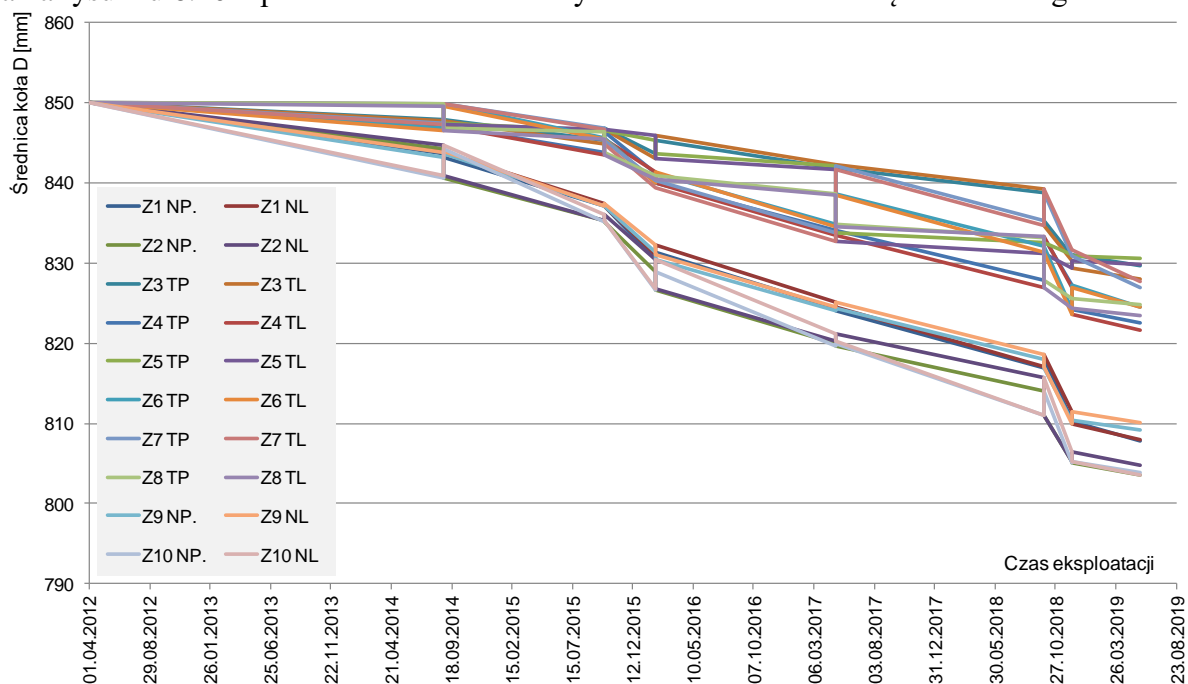
Rys. 6.7. Zależność średnicy kół od czasu eksploatacji dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe (konceptja ZZWP)



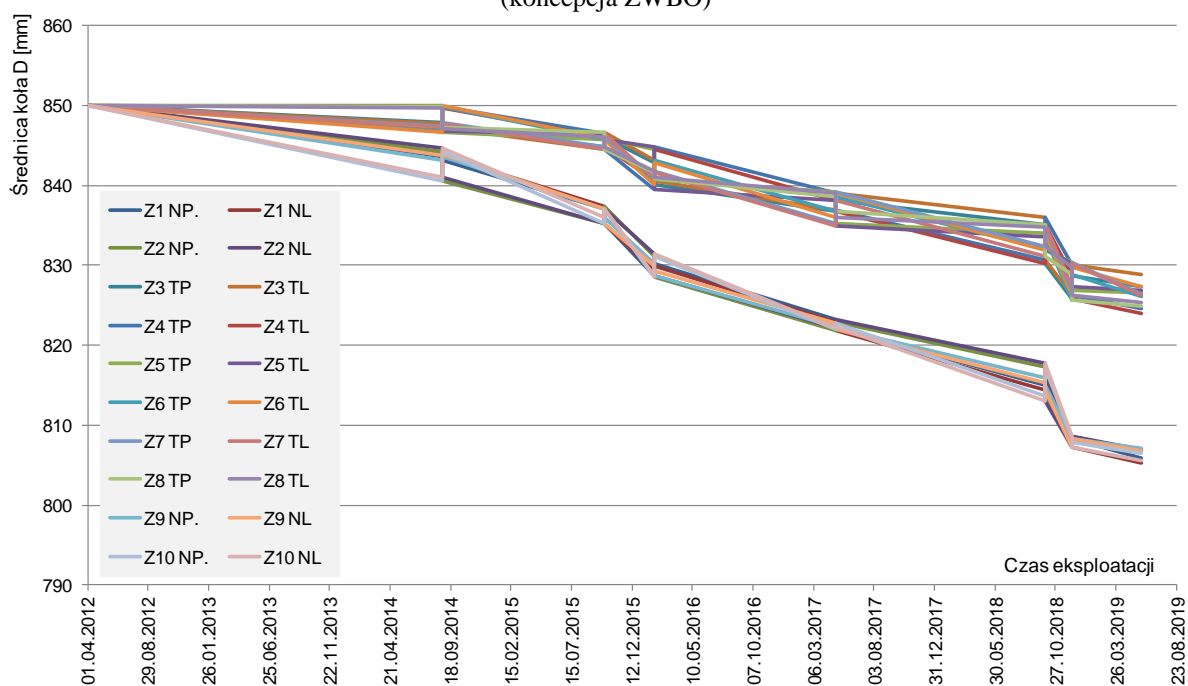
Rys. 6.8. Zależność średnicy kół od czasu eksploatacji dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w wózku (konceptja obrotu wózka o 180°)

Na rysunku 6.7 przedstawiono model zmiany średnicy kół w przypadku zastosowania koncepcji zamiany (migracji) zestawów kołowych w całym pojeździe. Na rysunku 6.8 przedstawiono zależność średnicy kół po zastosowaniu koncepcji z zamianą zestawów kołowych w wózku (konceptja obrotu wózka o 180°). Na rysunku 6.9 przedstawiono wartości

średnic jakie otrzymałby pojazd po zastosowaniu koncepcji zamiany wózków bez obracania, a na rysunku 6.10 – po zastosowaniu zamiany wózków z możliwością ewentualnego obrotu.



Rys. 6.9. Zależność średnicy kół od czasu eksploatacji dla koncepcji zamiany wózków bez obracania (konceptja ZWBO)



Rys. 6.10. Zależność średnicy kół od czasu eksploatacji dla koncepcji zamiany wózków z obracaniem (konceptja ZWZO)

Niezależnie od zastosowanej jednej z 4 koncepcji, w odniesieniu do klasycznego podejścia utrzymania zestawów kołowych w elektrycznym zespole trakcyjnym stwierdza się, że rozrzut wartości średnic przy ostatnim przeglądzie okresowym jest mniejszy niż jak obserwuje się to na rysunku 6.6. Ponadto obserwuje się wydzielenie charakterystyk średnicy kół zestawów napędnych względem charakterystyk zestawów tocznych. Zestawy kołowe napędne odznaczają się większym zużyciem kół ze względu na ich przeznaczenie i lokalizację na pojeździe.

Tab. 6.3. Wizualizacja migracji zestawów kołowych przy zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi w całym pojeździe

01.04.2012	30.08.2014	03.10.2015	06.02.2016	29.04.2017	30.09.2018	08.12.2018	27.05.2019
Z1 NP. Z1 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z9 NP. Z9 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z10 NP. Z10 NL	Z9 NP. Z9 NL	Z10 NP. Z10 NL
Z2 NP. Z2 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z10 NP. Z10 NL	Z10 NP. Z10 NL	Z9 NP. Z9 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z9 NP. Z9 NL
Z3 TP Z3 TL	Z3 TP Z3 TL	Z7 TP Z7 TL	Z5 TP Z5 TL	Z6 TP Z6 TL	Z7 TP Z7 TL	Z4 TP Z4 TL	Z7 TP Z7 TL
Z4 TP Z4 TL	Z4 TP Z4 TL	Z8 TP Z8 TL	Z6 TP Z6 TL	Z3 TP Z3 TL	Z6 TP Z6 TL	Z7 TP Z7 TL	Z4 TP Z4 TL
Z5 TP Z5 TL	Z5 TP Z5 TL	Z6 TP Z6 TL	Z7 TP Z7 TL	Z4 TP Z4 TL	Z3 TP Z3 TL	Z6 TP Z6 TL	Z5 TP Z5 TL
Z6 TP Z6 TL	Z6 TP Z6 TL	Z5 TP Z5 TL	Z4 TP Z4 TL	Z5 TP Z5 TL	Z8 TP Z8 TL	Z5 TP Z5 TL	Z8 TP Z8 TL
Z7 TP Z7 TL	Z7 TP Z7 TL	Z3 TP Z3 TL	Z8 TP Z8 TL	Z7 TP Z7 TL	Z4 TP Z4 TL	Z3 TP Z3 TL	Z6 TP Z6 TL
Z8 TP Z8 TL	Z8 TP Z8 TL	Z4 TP Z4 TL	Z3 TP Z3 TL	Z8 TP Z8 TL	Z5 TP Z5 TL	Z8 TP Z8 TL	Z3 TP Z3 TL
Z9 NP. Z9 NL	Z9 NP. Z9 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z10 NP. Z10 NL	Z9 NP. Z9 NL	Z10 NP. Z10 NL	Z1 NP. Z1 NL
Z10 NP. Z10 NL	Z10 NP. Z10 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z9 NP. Z9 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z2 NP. Z2 NL

Z1 NP. – koło prawe w pierwszym napędym zestawie kołowym,
 Z1 NL – koło lewe w pierwszym napędym zestawie kołowym,
 Z3 NP. – koło prawe w trzecim tocznym zestawie kołowym,
 Z3 NL – koło lewe w trzecim tocznym zestawie kołowym.

Tab. 6.4. Wizualizacja migracji zestawów kołowych przy zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi w wózku (zamiana zestawów kołowych w wózku lub obrót wózka)

01.04.2012	30.08.2014	03.10.2015	06.02.2016	29.04.2017	30.09.2018	08.12.2018	27.05.2019
Z1 NP. Z1 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z2 NL Z2 NP.	Z2 NL Z2 NP.	Z1 NP. Z1 NL	Z1 NP. Z1 NL	Z2 NL Z2 NP.	Z2 NL Z2 NP.
Z2 NP. Z2 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z1 NL Z1 NP.	Z1 NL Z1 NP.	Z2 NP. Z2 NL	Z2 NP. Z2 NL	Z1 NL Z1 NP.	Z1 NL Z1 NP.
Z3 TP Z3 TL	Z3 TP Z3 TL	Z4 TL Z4 TP	Z4 TL Z4 TP	Z3 TP Z3 TL	Z4 TL Z4 TP	Z3 TP Z3 TL	Z3 TP Z3 TL
Z4 TP Z4 TL	Z4 TP Z4 TL	Z3 TL Z3 TP	Z3 TL Z3 TP	Z4 TP Z4 TL	Z3 TL Z3 TP	Z4 TP Z4 TL	Z4 TP Z4 TL
Z5 TP Z5 TL	Z5 TP Z5 TL	Z6 TL Z6 TP	Z6 TL Z6 TP	Z5 TP Z5 TL	Z6 TL Z6 TP	Z5 TP Z5 TL	Z6 TL Z6 TP
Z6 TP Z6 TL	Z6 TP Z6 TL	Z5 TL Z5 TP	Z5 TL Z5 TP	Z6 TP Z6 TL	Z5 TL Z5 TP	Z6 TP Z6 TL	Z5 TL Z5 TP
Z7 TP Z7 TL	Z7 TP Z7 TL	Z8 TL Z8 TP	Z8 TL Z8 TP	Z7 TP Z7 TL	Z8 TL Z8 TP	Z7 TP Z7 TL	Z8 TL Z8 TP
Z8 TP Z8 TL	Z8 TP Z8 TL	Z7 TL Z7 TP	Z7 TL Z7 TP	Z8 TP Z8 TL	Z7 TL Z7 TP	Z8 TP Z8 TL	Z7 TL Z7 TP
Z9 NP. Z9 NL	Z9 NP. Z9 NL	Z10 NL Z10 NP.	Z10 NL Z10 NP.	Z9 NP. Z9 NL	Z10 NL Z10 NP.	Z9 NP. Z9 NL	Z9 NP. Z9 NL
Z10 NP. Z10 NL	Z10 NP. Z10 NL	Z9 NL Z9 NP.	Z9 NL Z9 NP.	Z10 NP. Z10 NL	Z9 NL Z9 NP.	Z10 NP. Z10 NL	Z10 NP. Z10 NL

Tab. 6.5. Wizualizacja migracji zestawów kołowych przy zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi poprzez zamianę wózków bez obracania

01.04.2012	30.08.2014	03.10.2015	06.02.2016	29.04.2017	30.09.2018	08.12.2018	27.05.2019
Z1 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.
Z1 NL	Z1 NL	Z9 NL	Z1 NL	Z9 NL	Z1 NL	Z9 NL	Z1 NL
Z2 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.
Z2 NL	Z2 NL	Z10 NL	Z2 NL	Z10 NL	Z2 NL	Z10 NL	Z2 NL
Z3 TP	Z3 TP	Z3 TP	Z5 TP	Z7 TP	Z7 TP	Z5 TP	Z3 TP
Z3 TL	Z3 TL	Z3 TL	Z5 TL	Z7 TL	Z7 TL	Z5 TL	Z3 TL
Z4 TP	Z4 TP	Z4 TP	Z6 TP	Z8 TP	Z8 TP	Z6 TP	Z4 TP
Z4 TL	Z4 TL	Z4 TL	Z6 TL	Z8 TL	Z8 TL	Z6 TL	Z4 TL
Z5 TP	Z5 TP	Z7 TP	Z7 TP	Z5 TP	Z3 TP	Z3 TP	Z5 TP
Z5 TL	Z5 TL	Z7 TL	Z7 TL	Z5 TL	Z3 TL	Z3 TL	Z5 TL
Z6 TP	Z6 TP	Z8 TP	Z8 TP	Z6 TP	Z4 TP	Z4 TP	Z6 TP
Z6 TL	Z6 TL	Z8 TL	Z8 TL	Z6 TL	Z4 TL	Z4 TL	Z6 TL
Z7 TP	Z7 TP	Z5 TP	Z3 TP	Z3 TP	Z5 TP	Z7 TP	Z7 TP
Z7 TL	Z7 TL	Z5 TL	Z3 TL	Z3 TL	Z5 TL	Z7 TL	Z7 TL
Z8 TP	Z8 TP	Z6 TP	Z4 TP	Z4 TP	Z6 TP	Z8 TP	Z8 TP
Z8 TL	Z8 TL	Z6 TL	Z4 TL	Z4 TL	Z6 TL	Z8 TL	Z8 TL
Z9 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.
Z9 NL	Z9 NL	Z1 NL	Z9 NL	Z1 NL	Z9 NL	Z1 NL	Z9 NL
Z10 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.
Z10 NL	Z10 NL	Z2 NL	Z10 NL	Z2 NL	Z10 NL	Z2 NL	Z10 NL

Tab. 6.6. Wizualizacja migracji zestawów kołowych przy zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi poprzez zamianę wózków z możliwością ich obracania

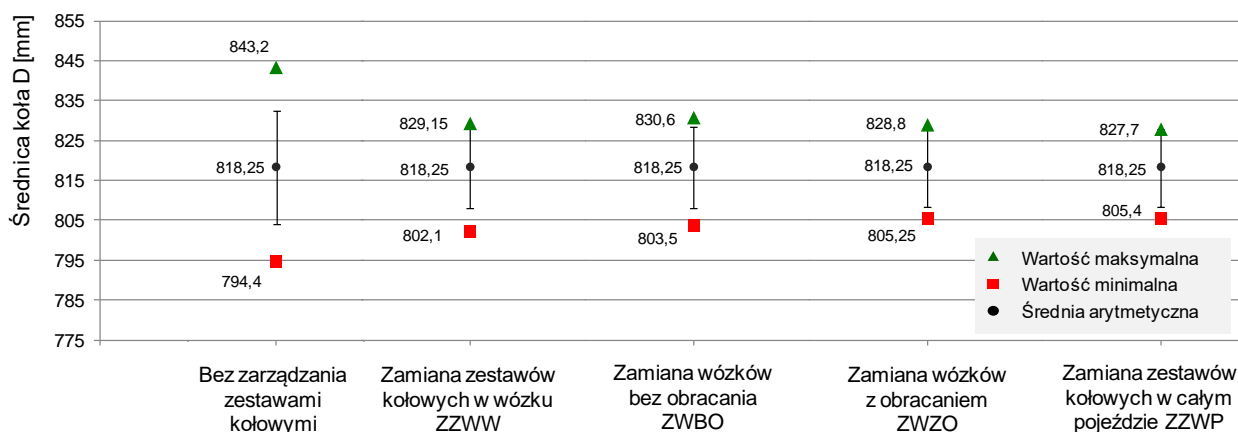
01.04.2012	30.08.2014	03.10.2015	06.02.2016	29.04.2017	30.09.2018	08.12.2018	27.05.2019
Z1 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.	Z10 NL	Z2 NL	Z1 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.
Z1 NL	Z1 NL	Z9 NL	Z10 NP.	Z2 NP.	Z1 NL	Z9 NL	Z1 NL
Z2 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.	Z9 NL	Z1 NL	Z2 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.
Z2 NL	Z2 NL	Z10 NL	Z9 NP.	Z1 NP.	Z2 NL	Z10 NL	Z2 NL
Z3 TP	Z3 TP	Z7 TP	Z4 TL	Z6 TL	Z5 TP	Z6 TL	Z5 TP
Z3 TL	Z3 TL	Z7 TL	Z4 TP	Z6 TP	Z5 TL	Z6 TP	Z5 TL
Z4 TP	Z4 TP	Z8 TP	Z3 TL	Z5 TL	Z6 TP	Z5 TL	Z6 TP
Z4 TL	Z4 TL	Z8 TL	Z3 TP	Z5 TP	Z6 TL	Z5 TP	Z6 TL
Z5 TP	Z5 TP	Z6 TL	Z5 TP	Z3 TP	Z7 TP	Z8 TL	Z4 TL
Z5 TL	Z5 TL	Z6 TP	Z5 TL	Z3 TL	Z7 TL	Z8 TP	Z4 TP
Z6 TP	Z6 TP	Z5 TL	Z6 TP	Z4 TP	Z8 TP	Z7 TL	Z3 TL
Z6 TL	Z6 TL	Z5 TP	Z6 TL	Z4 TL	Z8 TL	Z7 TP	Z3 TP
Z7 TP	Z7 TP	Z3 TP	Z8 TL	Z7 TP	Z3 TP	Z4 TL	Z8 TL
Z7 TL	Z7 TL	Z3 TL	Z8 TP	Z7 TL	Z3 TL	Z4 TP	Z8 TP
Z8 TP	Z8 TP	Z4 TP	Z7 TL	Z8 TP	Z4 TP	Z3 TL	Z7 TL
Z8 TL	Z8 TL	Z4 TL	Z7 TP	Z8 TL	Z4 TL	Z3 TP	Z7 TP
Z9 NP.	Z9 NP.	Z1 NP.	Z2 NL	Z10 NL	Z9 NP.	Z1 NP.	Z9 NP.
Z9 NL	Z9 NL	Z1 NL	Z2 NP.	Z10 NP.	Z9 NL	Z1 NL	Z9 NL
Z10 NP.	Z10 NP.	Z2 NP.	Z1 NL	Z9 NL	Z10 NP.	Z2 NP.	Z10 NP.
Z10 NL	Z10 NL	Z2 NL	Z1 NP.	Z9 NP.	Z10 NL	Z2 NL	Z10 NL

W tabelach 6.3-6.6 przedstawiono wizualizację migracji zestawów kołowych (wózków) w zależności od zastosowanej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi. W tabeli 6.3 przedstawiono wizualizację migracji zestawów kołowych w całym pojeździe. W tabeli 6.4 zaprezentowano koncepcję zamiany zestawów kołowych w wózku lub obrót wózka. Natomiast w tabelach 6.5 i 6.6 przedstawiono wizualizację migracji wózków bez ich obracania (zmiana lokalizacji) oraz migracji wózków z możliwością ich obrotu.

Na rysunku 6.11 oraz w tabeli 6.7 przedstawiono wartości skrajne tj. maksymalnej i minimalnej średnicy kół jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny EN76 podczas ostatniego przeglądu okresowego po zastosowaniu 4 zaproponowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami bez i z obracaniem. Dodatkowo przedstawiono wartości średniej arytmetycznej z 20 średnic i odchylenie standardowe dla każdej z koncepcji.

Tab. 6.7. Wartości średnic kół (maksymalnej i minimalnej) w mm uzyskane podczas ostatniego przeglądu okresowego P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN76

	Bez zarządzania ZK*	Zamiana ZK w wózku ZZWW	Zamiana wózków bez obracania ZWBO	Zamiana wózków z obracaniem ZWZO	Zamiana ZK w całym pojeździe ZZWP
Wartość MAX	843,2	829,15	830,6	828,8	827,7
Wartość MIN	794,4	802,1	803,5	805,25	805,4
Średnia ¹	818,25	818,25	818,25	818,25	818,25
Odchylenie standardowe ¹	14,15	10,15	10,11	9,79	9,74
Odchylenie standardowe ²	11,92	1,83	2,89	1,31	0,65
Odchylenie standardowe ³	7,13	3,99	2,52	0,63	0,55
ZK – zestaw kołowy ¹ – dla wszystkich zestawów kołowych,			² – dla napędnych zestawów kołowych, ³ – dla tocznych zestawów kołowych.		



Rys. 6.11. Wartości średnic kół (maksymalnej i minimalnej) uzyskane na ostatnim przeglądzie okresowym P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN76 w odniesieniu do wymiarów rzeczywistych bez zarządzania

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 6.11 stwierdzono, że w zakresie koła o najmniejszej średnicy z 10 zestawów kołowych zmierzonych po ostatnim przeglądzie okresowym P2, po zastosowaniu koncepcji zamiany zestawów w całym pojeździe, możliwe jest uzyskanie średnicy większej o 11 mm względem klasycznego podejścia wynikającego z dokumentacji systemu utrzymania bez stosowania zarządzania zestawami kołowymi. Podobny wzrost (wynoszący 10,85 mm) średnicy koła o najmniejszej średnicy, można uzyskać stosując metodę zamiany wózków z możliwością ich dodatkowego obrotu. Rozrzut wartości średnic (odchylenie standardowe) dla koncepcji z migracją zestawów kołowych w całym pojeździe wyniósł odpowiedni 0,65 mm i 0,55 dla zestawów napędnych i tocznych. W

przypadku klasycznego podejścia bez zarządzania zestawami kołowymi w analizowanym elektrycznym zespole trakcyjnym EN76, odchylenia standardowe wyniosły odpowiednio 11,92 mm i 7,13 mm. Zgodnie z DSU pojazdu zakres zużycia między średnicami max i min wynosi 70 mm. W tabeli 6.8 przedstawiono w mm oraz w ujęciu procentowym zmianę wymiaru na średnicy koła po zastosowaniu 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.

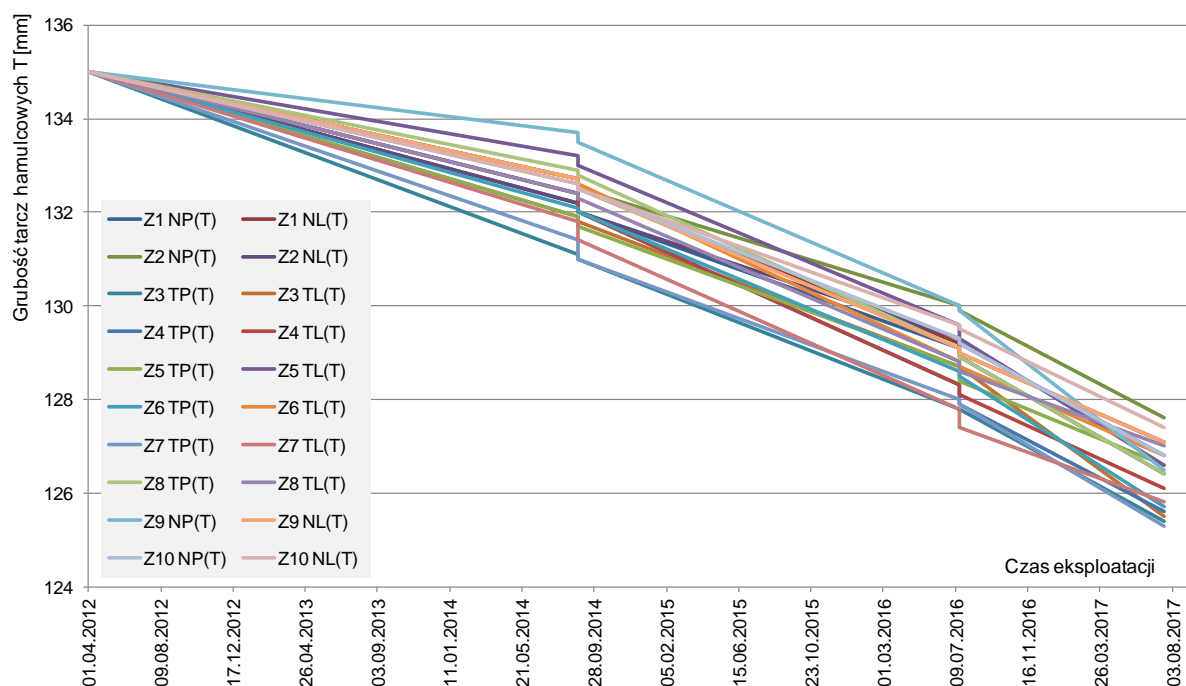
Tab. 6.8. Zmiana wymiaru na średnicy koła o największym zużyciu dla analizowanych koncepcji

	Zamiana ZK w wózku	Zamiana wózków bez obracania	Zamiana wózków z obracaniem	Zamiana ZK w całym pojeździe
Zmiana wymiaru w [mm]	7,70	9,10	10,85	11,00
Zmiana wymiaru w [%]	11,0	13,0	15,5	15,7

W ujęciu jakościowym (procentowym) zmiana wymiaru koła o najmniejszej średnicy wynosi od 11 do 15,7% w zależności od zastosowanej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.

6.4. Wyniki wartości grubości tarcz po zarządzaniu zestawami kołowymi i wózkami

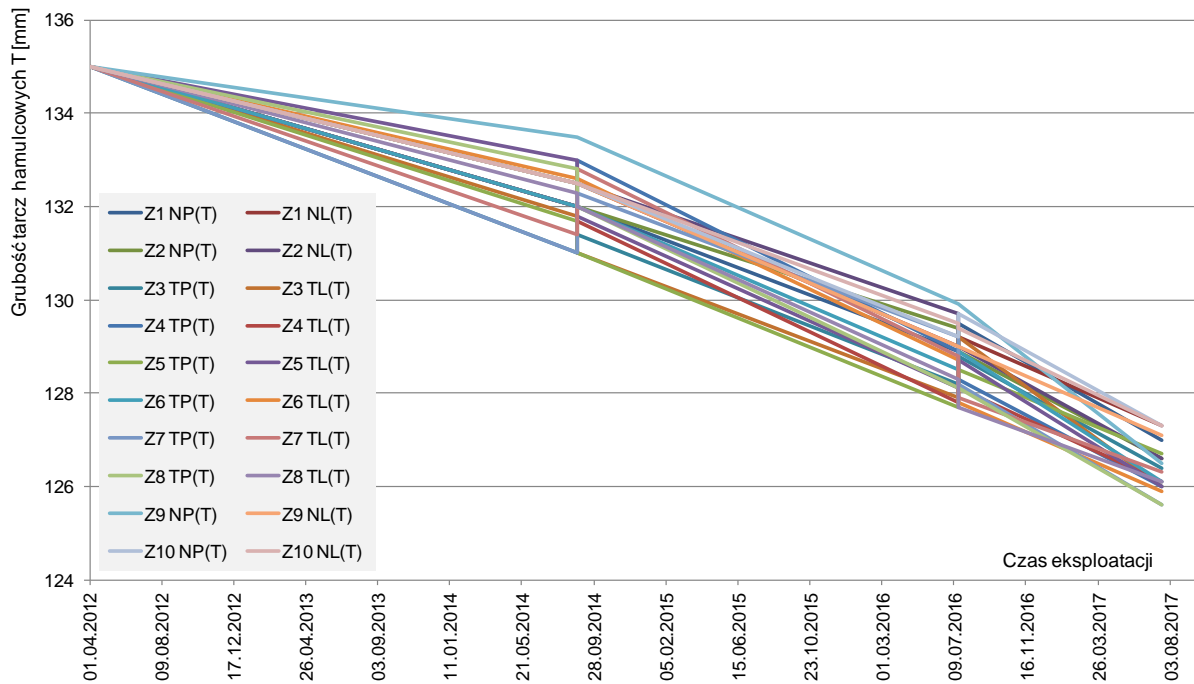
W celu zmniejszenia zużycia tarcz hamulcowych również dokonano próby zarządzania zestawami kołowymi czterema zaproponowanymi koncepcjami. Na podstawie wyników zużycia na grubości tarcz oraz wartości przetoczeń powierzchni ciernej jaki uzyskał jeden z analizowanych pojazdów EN76 eksploatowany w okresie od 01.04.2018 r. do 19.07.2017 r. (ostatni przegląd *P2* przed naprawą rewizyjną *P4*), również jak w przypadku kół - dokonano modelowego wyznaczenia charakterystyk zmiany grubości tarcz *T* w funkcji czasu. Na przykładowym rysunku 6.12 przedstawiono charakterystykę analizowanego pojazdu EN76, z którego zebrano dane o zużyciu tarcz hamulcowych oraz wartości przetoczeń tarcz, które zapisano wcześniej w tabeli 6.2. Na rysunku 6.12 nie zaznaczono wartości z poszczególnych pomiarów grubości tarcz hamulcowych zarejestrowanych podczas przeglądów *P2*, tylko wartości przed i po toczeniu zestawu kołowego na tarczach hamulcowych.



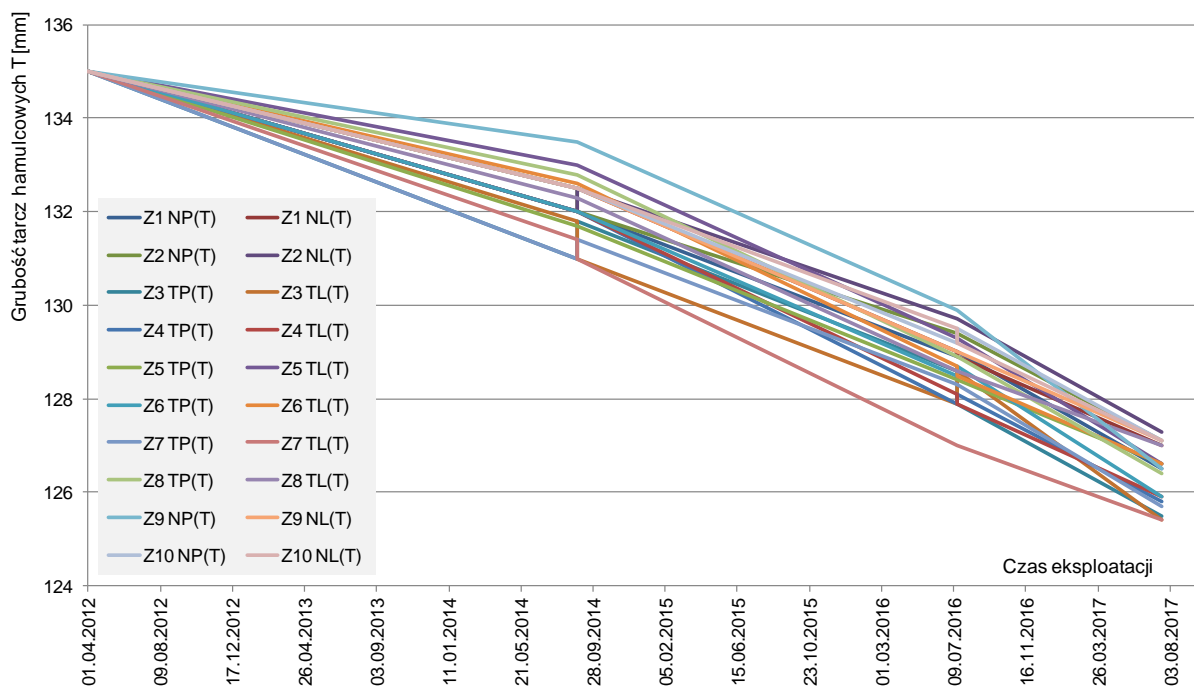
Rys. 6.12. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla klasycznego podejścia do utrzymania zestawów kołowych zgodnie z DSU w oparciu zsumowane wartości zużycia kół i przetoczeń kół

Analizując rysunek 6.12 z wykresem zmiany grubości tarcz hamulowych pojazdu EN76 stwierdza się, bardzo duży rozrzut wartości T podczas zarówno ostatniego przeglądu $P2$ jak i dwóch okresów kierowania zestawów kołowych na przetoczenie powierzchni czarnej tarcz hamulowych. Dla ostatniego przeglądu $P2$ wartości te znajdują się w zakresie od 127,6 do 125,3 mm z odchyleniem standardowym 0,67 mm. Potwierdza to potrzebę podjęcia takich działań aby rozrzut wartości grubości tarcz był mniejszy.

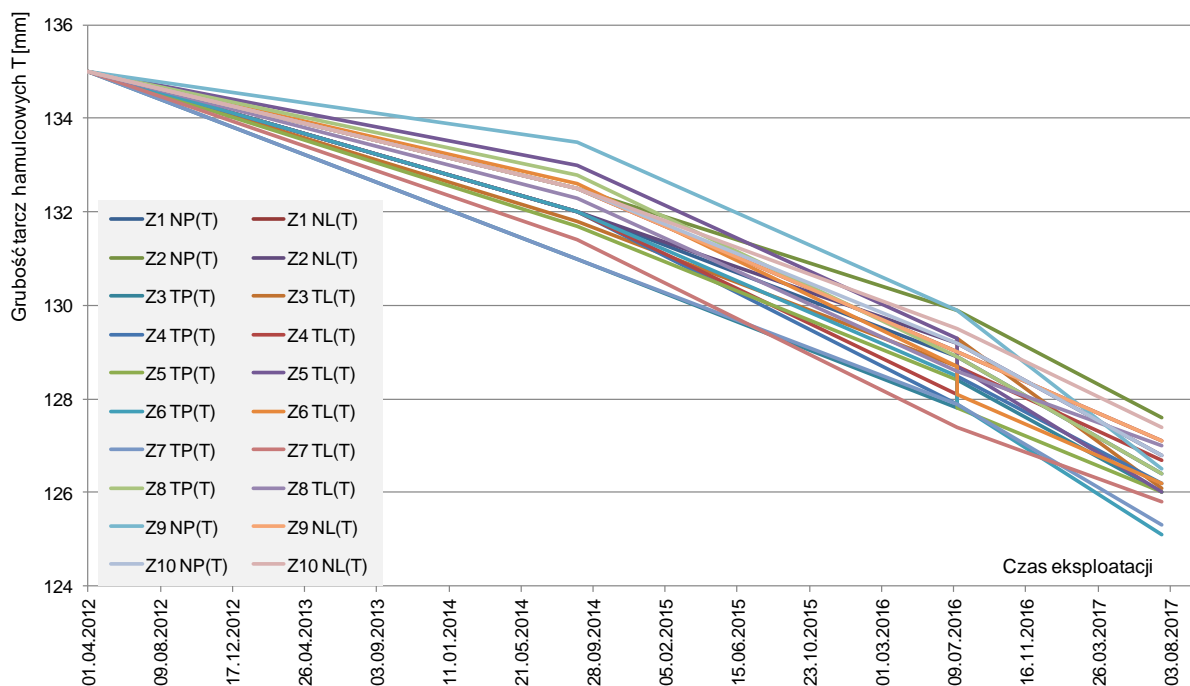
Na rysunkach 6.13-6.16 przedstawiono modele charakterystyk grubości tarcz w funkcji czasu po zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.



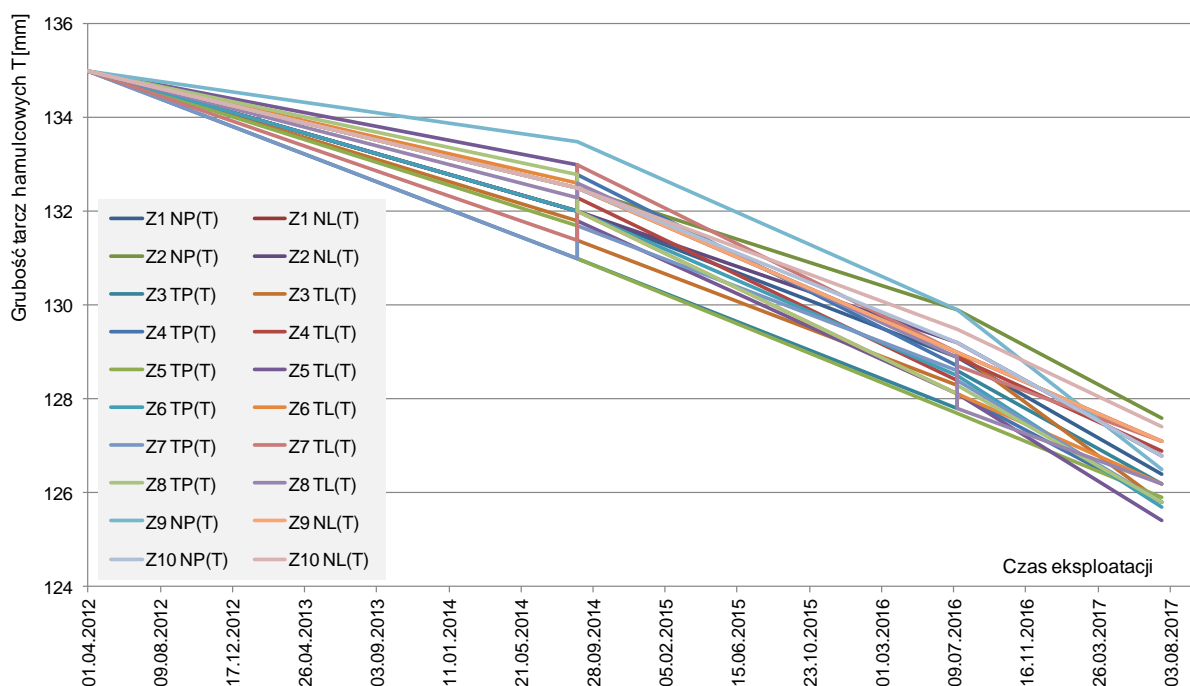
Rys. 6.13. Zależność grubości tarcz hamulowych od czasu dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe (konceptja ZZWP)



Rys. 6.14. Zależność grubości tarcz hamulowych od czasu dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w wózku (konceptja ZZWW)



Rys. 6.15. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla koncepcji zamiany wózków bez obracania (koncepcja ZWBO)



Rys. 6.16. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla koncepcji zamiany wózków z obracaniem (koncepcja ZWZO)

Analizując przebiegi zmiany grubości tarcz przedstawione na rysunkach 6.13-6.16 po zastosowaniu 4 koncepcji względem rysunku 6.12 bez zarządzania zestawami kołowymi stwierdzono brak zauważalnego zmniejszenia rozrzutu wartości grubości tarcz hamulcowych na ostatnim przeglądzie P2. Jedynie w przypadku koncepcji migracji zestawów kołowych w całym pojeździe obserwuje się nieznaczne zmniejszenie rozrzutu wartości na ostatnim przeglądzie okresowym. Ponadto nie obserwuje się dwóch grup charakterystyk grubości tarcz hamulcowych zestawów napędnych względem charakterystyk zestawów tocznych, co miało miejsce w przypadku zarządzania zestawami w zakresie średnic kół. Na podstawie danych

zawartych w tabeli 6.2 zauważa się, że zestawy napędne odznaczały się mniejszym zużyciem tarcz na ich grubości względem zestawów tocznych. Na zestawach napędnych głównie realizowane jest hamowanie elektrodynamiczne z dodatkowym hamulcem ciernych przez co zużycie tarcz jest nieznacznie mniejsze względem wózków tocznych.

W tabeli 6.9 przedstawiono wizualizację dla dwóch wybranych koncepcji migracji zestawów kołowych (wózków) w zakresie ograniczenia zużycia tarcz hamulcowych.

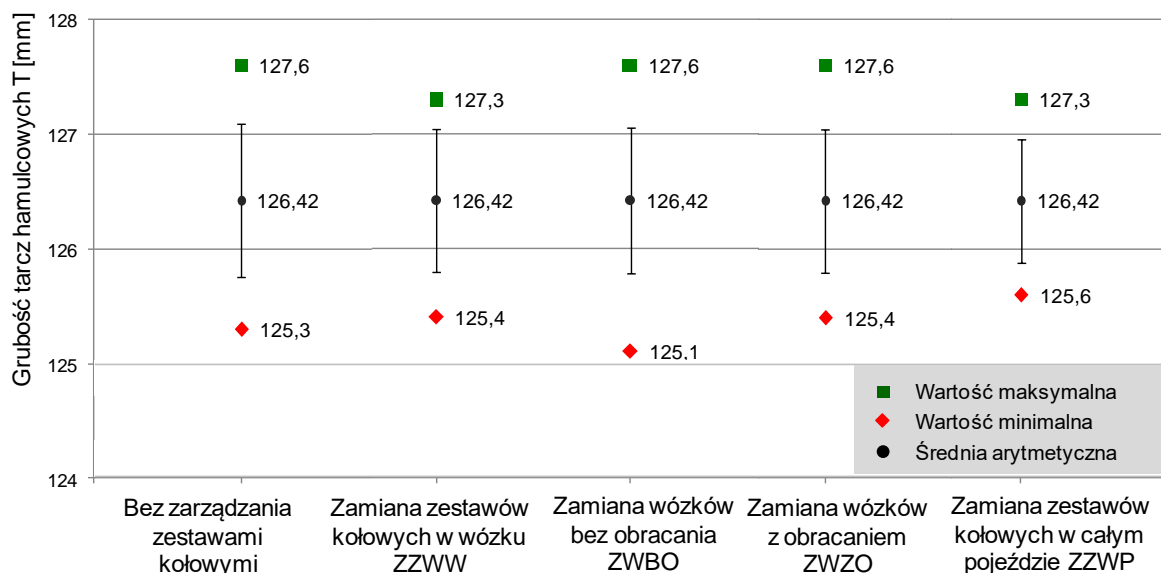
Tab. 6.9. Wizualizacja migracji zestawów kołowych dla zmiany grubości tarcz T przy zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi w całym pojeździe i migracji wózków z obracaniem

Zamiana ZK w całym pojeździe (ZZWP)				Zamiana wózków z obracaniem (ZWZO)			
01.04.2012	25.08.2014	30.08.2014	16.07.2016	01.04.2012	25.08.2014	30.08.2014	16.07.2016
Z1 NP(T)	Z1 NP(T)	Z1 NP(T)	Z10 NL(T)	Z1 NP(T)	Z1 NP(T)	Z1 NP(T)	Z1 NP(T)
Z1 NL(T)	Z1 NL(T)	Z1 NL(T)	Z10 NP(T)	Z1 NL(T)	Z1 NL(T)	Z1 NL(T)	Z1 NL(T)
Z2 NP(T)	Z2 NP(T)	Z2 NL(T)	Z1 NP(T)	Z2 NP(T)	Z2 NP(T)	Z2 NP(T)	Z2 NP(T)
Z2 NL(T)	Z2 NL(T)	Z2 NP(T)	Z1 NL(T)	Z2 NL(T)	Z2 NL(T)	Z2 NL(T)	Z2 NL(T)
Z3 TP(T)	Z3 TP(T)	Z7 TL(T)	Z8 TP(T)	Z3 TP(T)	Z3 TP(T)	Z7 TP(T)	Z5 TP(T)
Z3 TL(T)	Z3 TL(T)	Z7 TP(T)	Z8 TL(T)	Z3 TL(T)	Z3 TL(T)	Z7 TL(T)	Z5 TL(T)
Z4 TP(T)	Z4 TP(T)	Z5 TL(T)	Z4 TL(T)	Z4 TP(T)	Z4 TP(T)	Z8 TP(T)	Z6 TP(T)
Z4 TL(T)	Z4 TL(T)	Z5 TP(T)	Z4 TP(T)	Z4 TL(T)	Z4 TL(T)	Z8 TL(T)	Z6 TL(T)
Z5 TP(T)	Z5 TP(T)	Z3 TP(T)	Z6 TP(T)	Z5 TP(T)	Z5 TP(T)	Z3 TP(T)	Z3 TP(T)
Z5 TL(T)	Z5 TL(T)	Z3 TL(T)	Z6 TL(T)	Z5 TL(T)	Z5 TL(T)	Z3 TL(T)	Z3 TL(T)
Z6 TP(T)	Z6 TP(T)	Z6 TP(T)	Z5 TL(T)	Z6 TP(T)	Z6 TP(T)	Z4 TP(T)	Z4 TP(T)
Z6 TL(T)	Z6 TL(T)	Z6 TL(T)	Z5 TP(T)	Z6 TL(T)	Z6 TL(T)	Z4 TL(T)	Z4 TL(T)
Z7 TP(T)	Z7 TP(T)	Z8 TL(T)	Z7 TL(T)	Z7 TP(T)	Z7 TP(T)	Z5 TP(T)	Z8 TL(T)
Z7 TL(T)	Z7 TL(T)	Z8 TP(T)	Z7 TP(T)	Z7 TL(T)	Z7 TL(T)	Z5 TL(T)	Z8 TP(T)
Z8 TP(T)	Z8 TP(T)	Z4 TP(T)	Z3 TL(T)	Z8 TP(T)	Z8 TP(T)	Z6 TP(T)	Z7 TL(T)
Z8 TL(T)	Z8 TL(T)	Z4 TL(T)	Z3 TP(T)	Z8 TL(T)	Z8 TL(T)	Z6 TL(T)	Z7 TP(T)
Z9 NP(T)	Z9 NP(T)	Z9 NP(T)	Z9 NP(T)	Z9 NP(T)	Z9 NP(T)	Z9 NP(T)	Z9 NP(T)
Z9 NL(T)	Z9 NL(T)	Z9 NL(T)	Z9 NL(T)	Z9 NL(T)	Z9 NL(T)	Z9 NL(T)	Z9 NL(T)
Z10 NP(T)	Z10 NP(T)	Z10 NP(T)	Z2 NP(T)	Z10 NP(T)	Z10 NP(T)	Z10 NP(T)	Z10 NP(T)
Z10 NL(T)	Z10 NL(T)	Z10 NL(T)	Z2 NL(T)	Z10 NL(T)	Z10 NL(T)	Z10 NL(T)	Z10 NL(T)

Tab. 6.10 Wartości grubości tarcz hamulcowych (maksymalnej i minimalnej) w mm uzyskane podczas ostatniego przeglądu okresowego P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN76 względem podejścia zgodnego w DSU

	Bez zarządzania ZK*	Zamiana ZK w wózku ZZWW	Zamiana wózków bez obracania ZWBO	Zamiana wózków z obracaniem ZWZO	Zamiana ZK w całym pojeździe ZZWP
Wartość MAX	127,6	127,3	127,6	127,6	127,3
Wartość MIN	125,3	125,4	125,1	125,4	125,6
Średnia ¹	126,42	126,42	126,42	126,42	126,42
Odchylenie standardowe ¹	0,668	0,624	0,636	0,624	0,535
Odchylenie standardowe ²	0,390	0,278	0,390	0,390	0,324
Odchylenie standardowe ³	0,567	0,525	0,502	0,475	0,295
ZK – zestaw kołowy					
¹ – dla wszystkich zestawów kołowych,					
² – dla napędnych zestawów kołowych,					
³ – dla tocznych zestawów kołowych.					

Na rysunku 6.17 oraz w tabeli 6.10 przedstawiono wartości skrajne dla grubości tarcz hamulcowych (wartość maksymalna, minimalna) jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny EN76 podczas ostatniego przeglądu okresowego po zastosowaniu 4 zaproponowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami bez i z obracaniem. Dodatkowo przedstawiono wartości średniej arytmetycznej z 20 pomiarów grubości tarcz hamulcowych i odchylenie standardowe dla każdej z koncepcji.



Rys. 6.17 Wartości grubości tarcz hamulcowych (maksymalnej i minimalnej) uzyskane na ostatnim przeglądzie okresowym P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN76 w odniesieniu do wymiarów rzeczywistych bez zarządzania

Analizując dane przedstawione na rysunku 6.17 stwierdzono, że tylko koncepcja zamiany wózków bez odwracania nie zapewniła zwiększenia wartości grubości jednej z tarcz o największym zużyciu względem klasycznego podejścia do eksploatacji zestawów kołowych zgodnie z DSU pojazdu. Uzyskano wartość 125,1 mm na jednym z zestawów względem podejścia bez zarządzania zestawami kołowymi, gdzie wartość minimalna wyniosła 125,3 mm. Należy tłumaczyć to faktem, że w przypadku tarcz hamulcowych odbyły się tylko 2 przetoczenia tarcz hamulcowych względem kół w których zarejestrowano 6 przetoczeń, co zapewniało więcej okresów do zamiany wózków w pojeździe. Dla pozostałych koncepcji możliwe było uzyskanie wyższych wartości minimalnych. Najlepszy wynik uzyskano dla zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe gdzie uzyskano wartość minimalną wynoszącą 125,6 mm względem wartości 125,3 mm dla podejścia bez zamiany zestawów kołowych. Dla migracji zestawów kołowych w całym pojeździe uzyskano mniejsze odchylenie standardowe wyników grubości tarcz hamulcowych na ostatnim przeglądzie okresowym wynoszącym 0,53 mm w stosunku do podejścia bez zarządzania zestawami kołowymi, które wyniosło 0,67 mm. Mniejszy przyrost wymiaru minimalnego wynoszący 125,4 mm uzyskano przy dwóch koncepcjach tj. zamiany zestawów kołowych w wózku oraz zamiany wózków z obracaniem z odchyleniem standardowym wynoszącym 0,62 mm.

Zgodnie z DSU pojazdu zakres zużycia tarcz hamulcowych (lewej i prawej zamocowanej do koła) wynosi 10 mm. W tabeli 6.11 przedstawiono milimetrach oraz w ujęciu procentowym zmianę wymiaru na grubości tarcz hamulcowych po zastosowaniu trzech koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.

Tab. 6.11. Zmiana wymiaru na grubości tarczy hamulcowej o największym zużyciu dla analizowanych koncepcji

	Zamiana ZK w wózku	Zamiana wózków z obracaniem	Zamiana ZK w całym pojeździe
Zmiana wymiaru w [mm]	0,1	0,1	0,3
Zmiana wymiaru w [%]	1,0	1,0	3,0

W ujęciu jakościowym (procentowym) zmiana wymiaru na grubości tarczy o najmniejszym wymiarze wynosi od 1 do 3 % w zależności od zastosowanej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi. Koncepcja związana z zamianą wózków bez obracania nie przyniosła poprawy i zwiększenia wymiary minimalnej grubości tarcz hamulcowych. Na tej podstawie stwierdzono, że w okresie 5 lat eksploatacji pojazdu dwa okresy podczas których odbyło się toczenie powierzchni ciernej i zamiana zestawów kołowych lub wózków w inne lokalizacje na pojeździe jest za mała. Konieczne jest wprowadzenie dodatkowych okresów pomiędzy przetoczeniami na przeprowadzenie migracji zestawów kołowych i wózków. W przypadku zarządzania zestawami w celu zwiększenia wymiaru średnicy koła przeprowadzono 6 okresów związanych z zamianą zestawów kołowych i wózków. W kolejnym etapie dla poprawy (zwiększenia) wymiaru tarczy hamulcowej o najmniejszej grubości podjęto decyzję o 5 okresach na zamianę zestawów kołowych i wózków, zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 6.12.

Tab. 6.12. Wartości zsumowanego zużycia tarcz hamulcowych między przeglądami P2 i toceniem profilu tarczy wraz z wartościami grubości warstwy skrawanej dla poszczególnych tarcz zespołu trakcyjnego EN76

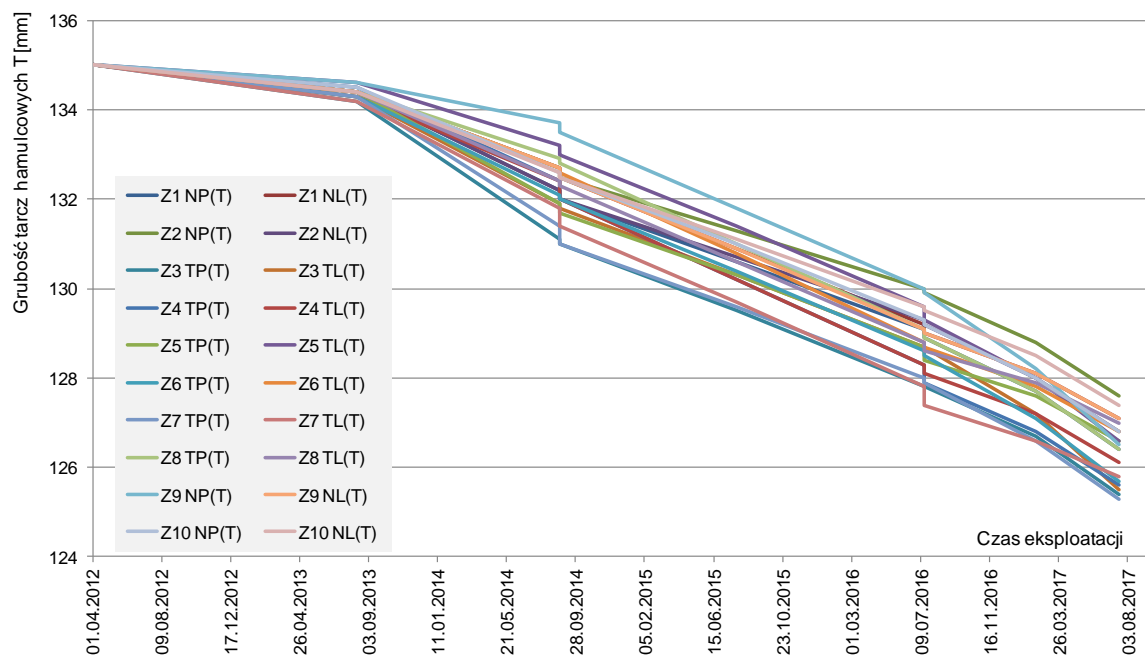
	Z ₁₋₆	Z ₇₋₁₂	T ₁	Z ₁₃₋₁₉	Z ₂₀₋₂₅	T ₂	Z ₂₆₋₂₉	Z ₃₀₋₃₃
Z1 NP(T)	0,6	2,2	0,2	1,4	1,5	0,2	1,2	1,3
Z1 NL(T)	0,6	1,7	0,2	1,6	1,7	0,2	0,9	1
Z2 NP(T)	0,6	1,7	0,2	1,2	1,3	0,1	1,1	1,2
Z2 NL(T)	0,6	2,2	0,2	1,3	1,4	0,1	1,2	1,2
Z3 TP(T)	0,8	3,1	0,1	1,5	1,7	0	1,1	1,3
Z3 TL(T)	0,7	2,4	0,1	1,5	1,6	0	1,5	1,7
Z4 TP(T)	0,5	2,1	0,4	1,8	1,9	0,4	1,1	1,2
Z4 TL(T)	0,7	1,9	0,4	1,8	1,9	0,2	0,9	1,1
Z5 TP(T)	0,6	2,5	0,2	1,4	1,6	0,3	0,8	1
Z5 TL(T)	0,4	1,4	0,2	1,6	1,8	0,3	1,3	1,4
Z6 TP(T)	0,7	2,2	0,1	1,6	1,8	0,1	1,4	1,4
Z6 TL(T)	0,6	1,7	0,1	1,8	2	0,1	0,9	1
Z7 TP(T)	0,7	2,9	0,4	1,4	1,6	0,1	1,3	1,3
Z7 TL(T)	0,8	2,4	0,4	1,7	1,9	0,4	0,8	0,8
Z8 TP(T)	0,6	1,5	0,1	1,8	1,9	0,2	1,2	1,3
Z8 TL(T)	0,6	2	0,1	1,7	1,8	0,2	0,7	0,9
Z9 NP(T)	0,4	0,9	0,2	1,7	1,8	0,1	1,7	1,7
Z9 NL(T)	0,6	1,7	0,2	1,6	1,8	0,1	0,9	1
Z10 NP(T)	0,5	1,9	0,1	1,5	1,7	0,1	1,2	1,2
Z10 NL(T)	0,6	1,8	0,1	1,4	1,5	0,1	1	1,1

Z1 NP(T) – prawe tarcze napędne zestawu kołowego nr 1,
 Z1 NL(T) – lewe tarcze napędne zestawu kołowego nr 1,
 Z3 TP(T) – prawe tarcze tocznego zestawu kołowego nr 3,
 Z3 TL(T) – lewe tarcze tocznego zestawu kołowego nr 3,
 Z₁₋₆ – suma zużycia tarcz hamulcowych zmierzona od pierwszego do szóstego przeglądu P2 w [mm],
 T₁ – wartość grubości warstwy skrawanej podczas pierwszego toczenia tarcz hamulcowych w [mm].

Zdecydowano, że w każdym okresie po przetoczenia tarcz, dodano podczas przeglądu P2 związanego tylko z pomiarami geometrycznymi zestawów kołowych dodatkową czynność na zamianę zestawów kołowych lub wózków. Stąd przeglądy okresowe od pierwszego do

dwunastego, w połowie okresu tj. w planowanym terminie $P2$ - 12.08.2013 r. zostały rozszerzone na wspomnianą zamianę zestawów kołowych. Podobnie w okresie od 13 do 25 przeglądu $P2$ w połowie tego okresu tj. w dniu 28.07.2015 r. również dokonano zamiany zestawów kołowych lub wózków. W ostatnim okresie po drugim toczeniu tarcz hamulcowych między 26, a 33 przeglądem okresowym w dniu 11.02.2017 r. również dokonano ostatniej migracji zestawów kołowych lub wózków.

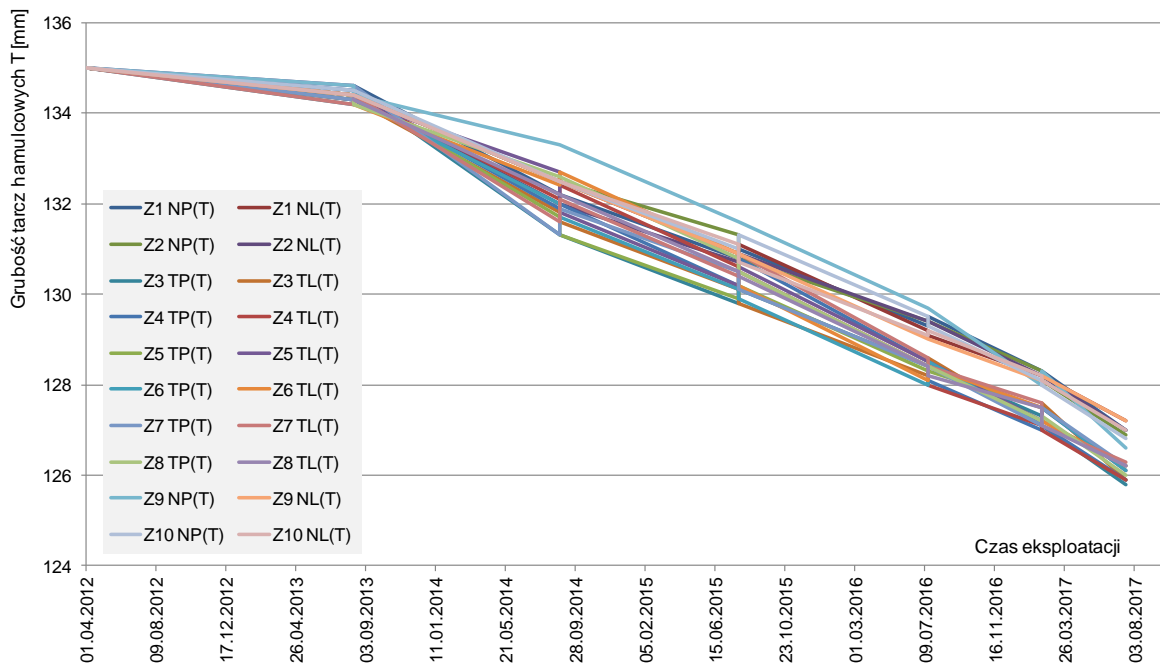
Na rysunku 6.18 przedstawiono charakterystykę zmiany grubości tarcz hamulcowych na podstawie pomiarów rzeczywistych (bez wdrożenia koncepcji zarządzania zestawami kołowymi) na analizowanym pojeździe EN76. Na wykresie zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 6.12 uwzględniono zużycia z 6 okresów uwzględniających zebrane dane zużycia tarcz hamulcowych oraz wartości przetoczeń tarcz hamulcowych w dwóch okresach (T_1 i T_2).



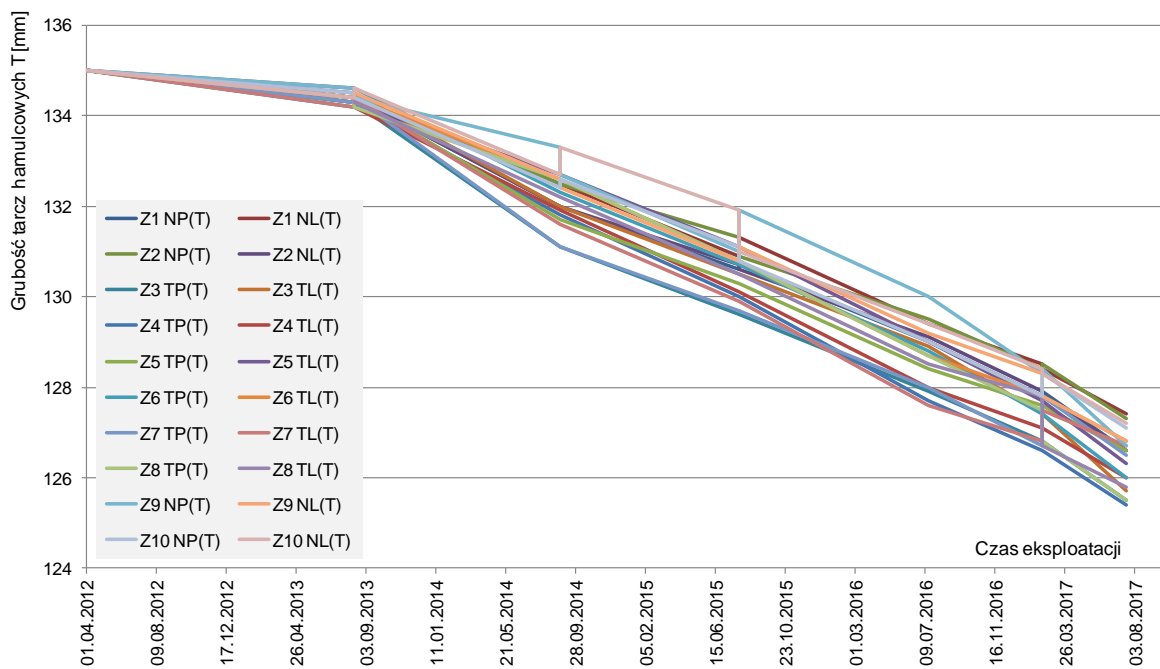
Rys. 6.18. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla klasycznego podejścia do utrzymania zestawów kołowych zgodnie z DSU w oparciu zsumowane wartości zużycia tarcz i przetoczeń

Na rysunkach 6.19-6.22 przedstawiono modele charakterystyk zmiany grubości tarcz w funkcji czasu po zastosowaniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi z uwzględnieniem 5 okresów zamiany zestawów kołowych lub wózków. Na wcześniejszych rysunkach (6.13-6.16) założono tylko 2 okresy na migracje zestawów kołowych lub wózków, w których podjęta została decyzja o przetoczeniu tarcz hamulcowych na powierzchni ciernej.

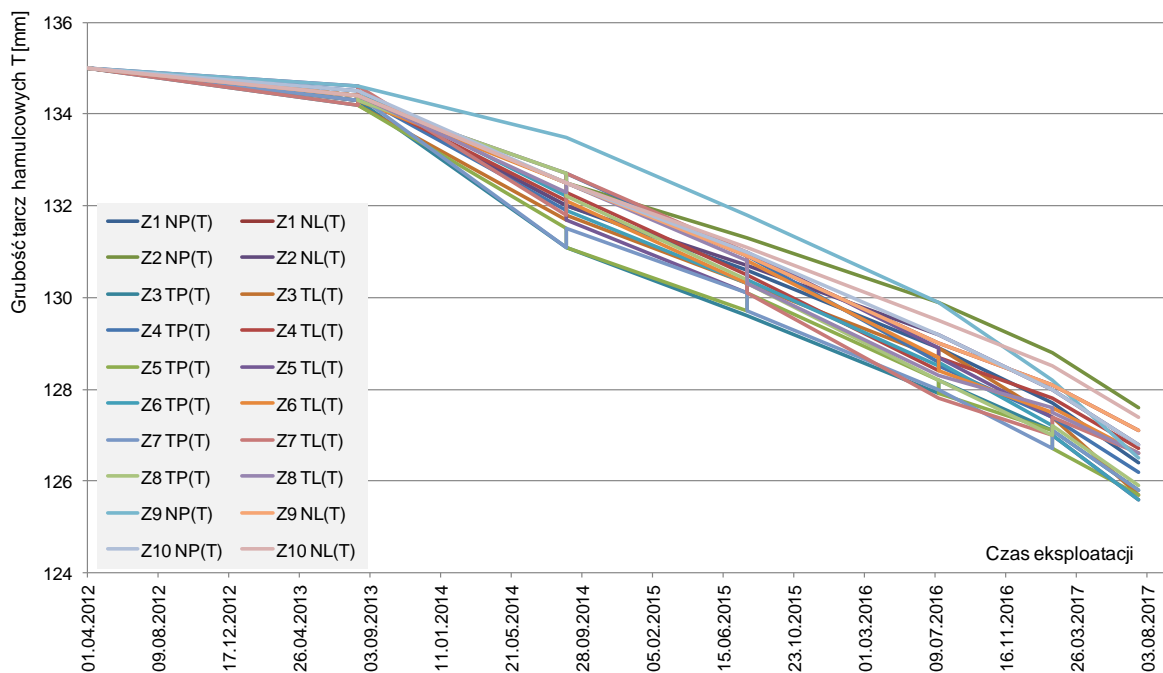
Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 6.19-6.22 po zastosowaniu 4 koncepcji względem rysunku 6.18 bez zarządzania zestawami kołowymi zaobserwowano nieznaczne zmniejszenie rozrzutu wartości grubości tarcz hamulcowych na ostatnim przeglądzie $P2$. Rozrzut wartości grubości tarcz hamulcowych rozumiany odchyleniem standardowym dla najlepszej koncepcji związanej z migracją zestawów kołowych w całym pojeździe wyniósł 0,47 mm przy podejściu klasycznym bez zarządzania zestawami kołowymi wynoszącym 0,67 mm. W przypadku wspomnianej koncepcji ZZWP obserwuje się dwie grupy charakterystyk zmiany grubości tarcz hamulcowych w funkcji czasu. Pierwsza grupa o wyższych wartościach T dotyczy zestawów napędnych, natomiast druga grupa o wartościach niższych związana jest z zestawami tocznymi, co przedstawia rysunek 6.19.



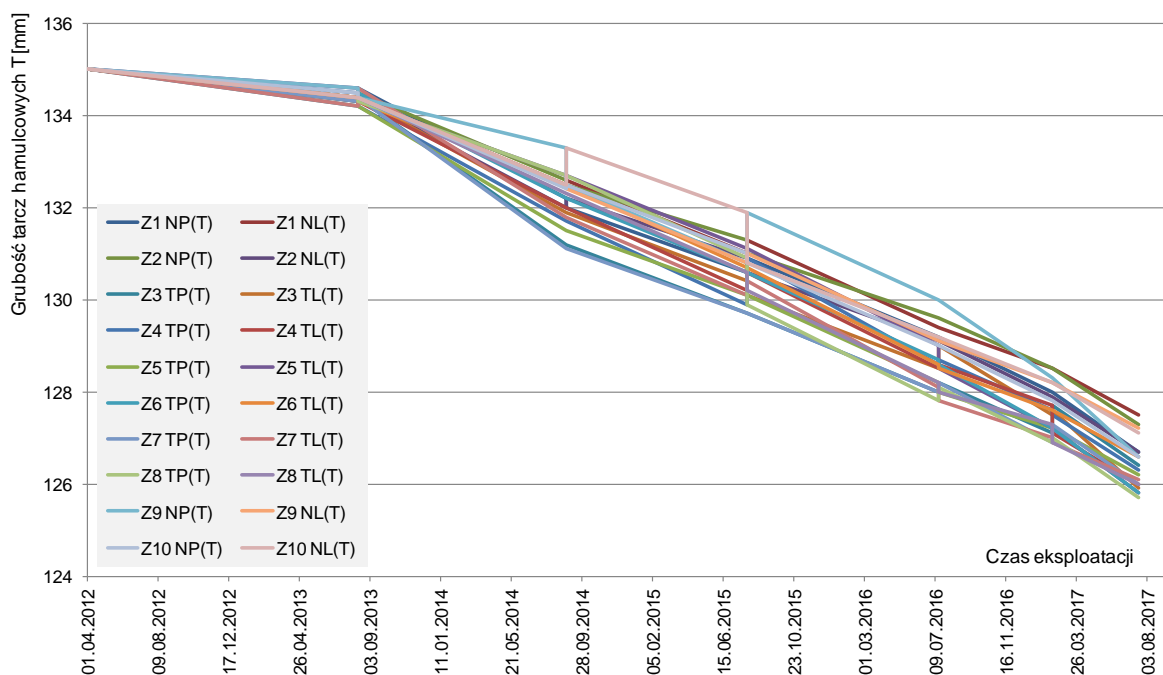
Rys. 6.19 Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe (koncepcja ZZWP)



Rys. 6.20. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w wózku (koncepcja ZZWW)



Rys. 6.21. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla koncepcji zamiany wózków bez obracania (koncepcja ZWBO)



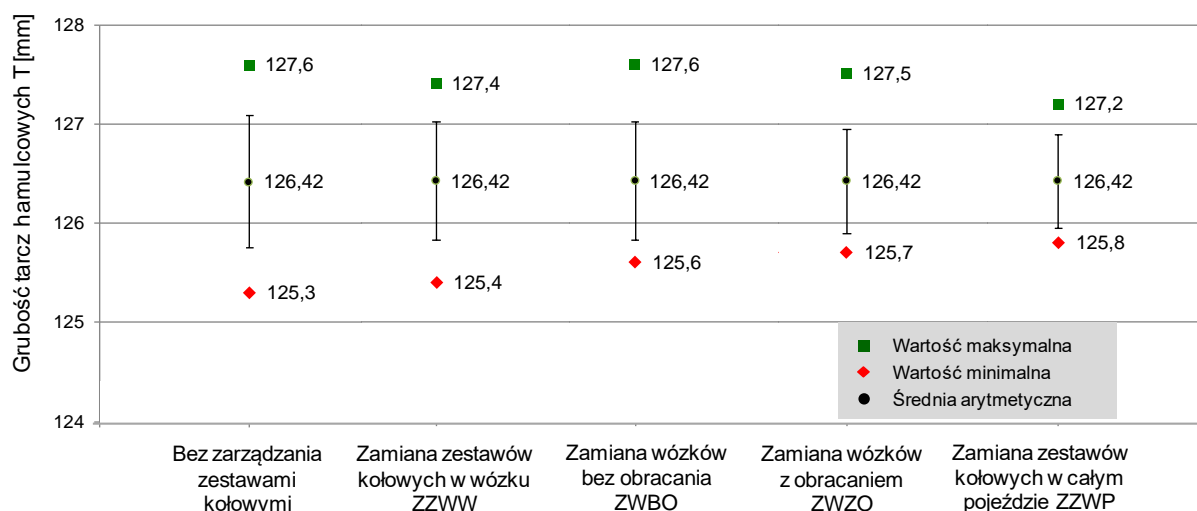
Rys. 6.22. Zależność grubości tarcz hamulcowych od czasu dla koncepcji zamiany wózków z obracaniem (koncepcja ZWZO)

Na rysunku 6.23 oraz w tabeli 6.13 przedstawiono wartości skrajne dla grubości tarcz hamulcowych (wartość *max* i *min*) jakie uzyskałby analizowany zespół trakcyjny podczas ostatniego przeglądu okresowego po zastosowaniu 4 zaproponowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami przy 5 okresach czasowych zamiany zestawów kołowych lub wózków. W tabeli 6.13 dodatkowo przedstawiono wartości przy 2 okresach czasowych na zamianę zestawów kołowych lub wózków (dane z tabeli 6.10).

Tab. 6.13. Wartości grubości tarcz hamulcowych (maksymalnej i minimalnej) w mm uzyskane podczas ostatniego przeglądu okresowego P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN76 względem podejścia zgodnego w DSU

Dla 2 okresów na zamianę ZK lub wózków					
	Bez zarządzania ZK*	Zamiana ZK w wózku ZZWW	Zamiana wózków bez obracania ZWBO	Zamiana wózków z obracaniem ZWZO	Zamiana ZK w całym pojeździe ZZWP
Wartość MAX	127,6	127,3	127,6	127,6	127,3
Wartość MIN	125,3	125,4	125,1	125,4	125,6
Średnia ¹	126,42	126,42	126,42	126,42	126,42
Odchylenie standardowe ¹	0,668	0,624	0,636	0,624	0,535
Dla 5 okresów na zamianę ZK lub wózków					
Wartość MAX	127,6	127,4	127,6	127,5	127,2
Wartość MIN	125,3	125,4	125,6	125,7	125,8
Średnia ¹	126,42	126,42	126,42	126,42	126,42
Odchylenie standardowe ³	0,668	0,600	0,600	0,525	0,470

ZK – zestaw kołowy
¹ – dla wszystkich zestawów kołowych.



Rys. 6.23 Wartości grubości tarcz hamulcowych (maksymalnej i minimalnej) uzyskane na ostatnim przeglądzie okresowym P2 po zastosowaniu 5 okresów na migrację zestawów kołowych lub wózków w zespole trakcyjnym EN76 w odniesieniu do wymiarów rzeczywistych bez zarządzania

Analizując dane zawarte na rysunku 6.23 stwierdzono, że przy 5 okresach czasowych przeznaczonych na zamianę zestawów kołowych lub wózków (bez obracania i z obracaniem) możliwe jest dla wszystkich rozpatrywanych koncepcji zwiększenie wartości grubości jednej tarcz o największym zużyciu względem klasycznego podejścia do eksploatacji zestawów kołowych zgodnie z DSU pojazdu. Dla koncepcji zarządzania zestawami kołowymi w całym pojeździe uzyskano wartość minimalną wynoszącą 125,8 mm przy 125,3 mm bez zastosowania migracji zestawów kołowych lub wózków. Pozostałe koncepcje umożliwiają uzyskanie wymiaru minimalnego 125,4 mm dla ZZWW, 125,6 mm dla ZWBO i 125,7 mm dla koncepcji ZWZO. Rozrzuty wartości grubości tarcz hamulcowych jako odchylenie standardowe od wartości średniej były mniejsze względem podejścia bez wdrożenia koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami i wyniosły odpowiednio 0,470 mm dla ZZWP, 0,525 mm dla ZWZO, 0,600 mm ZWBO i koncepcji ZZWW przy odchyleniu standardowym 0,668 mm dla klasycznego podejścia bez migracji zestawów kołowych lub wózków.

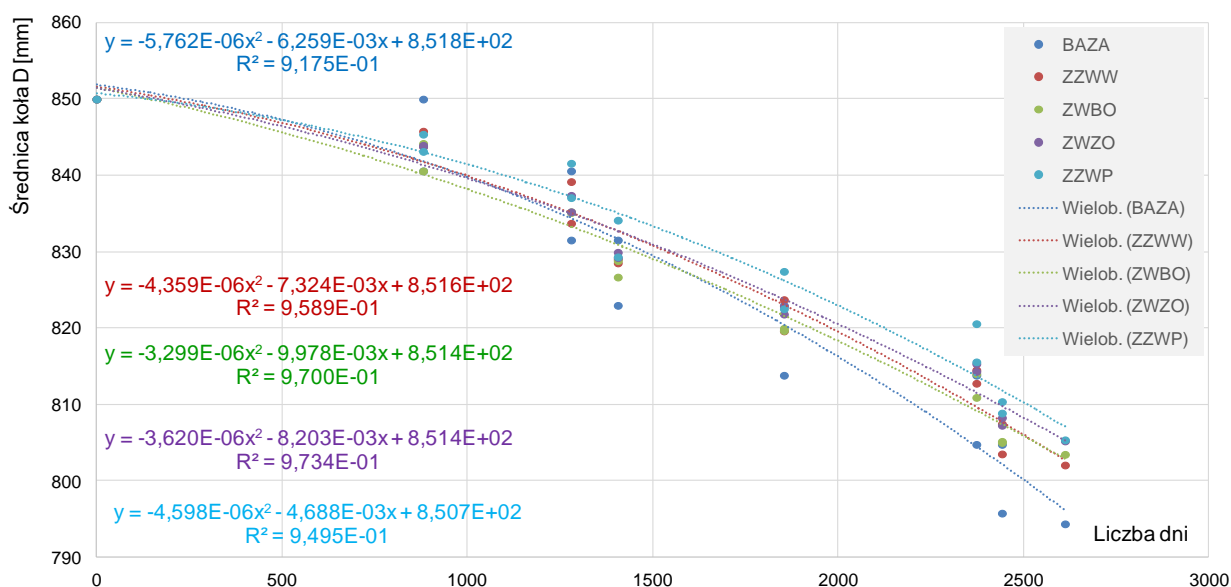
W tabeli 6.14 przedstawiono wartości zmiany wymiaru grubości tarcz hamulcowych w milimetrach oraz w procentach po zastosowaniu 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.

Tab. 6.14. Zmiana wymiaru na grubości tarczy hamulcowej o największym zużyciu dla analizowanych koncepcji w odniesieniu do podejścia bez migracji zestawów kołowych lub wózków

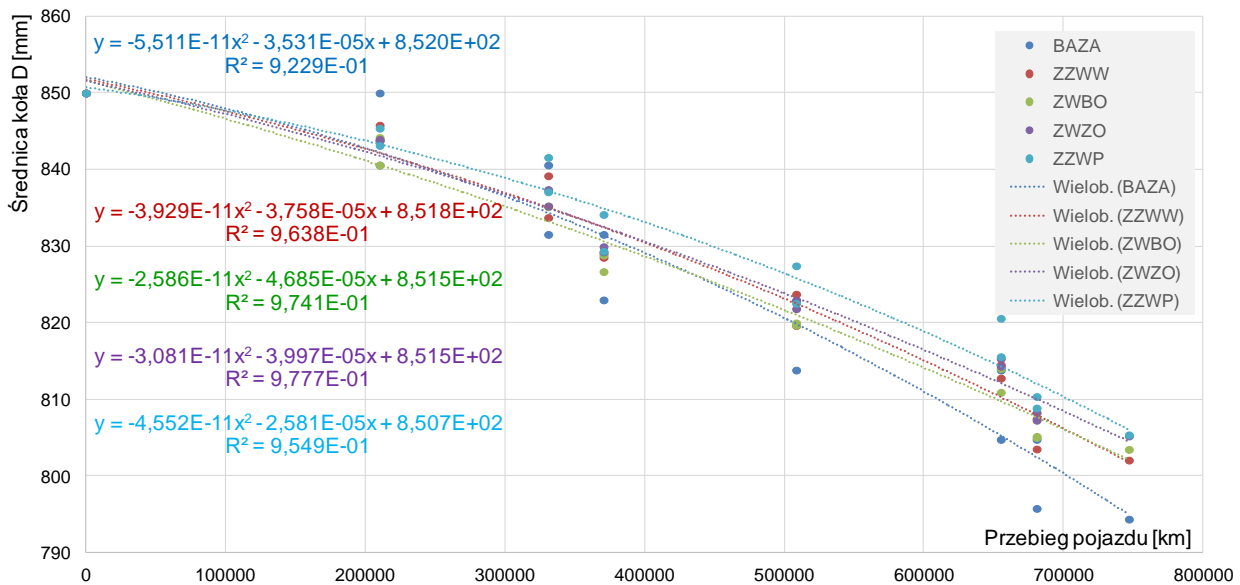
	Zamiana ZK w wózku	Zamiana wózków bez obracania	Zamiana wózków z obracaniem	Zamiana ZK w całym pojeździe
Zmiana wymiaru w [mm]	0,1	0,3	0,4	0,5
Zmiana wymiaru w [%]	1,0	3,0	4,0	5,0

W ocenie jakościowej (procentowej) zmiana wymiaru na grubości tarczy o największym zużyciu wynosi od 1 do 5 % w zależności od zastosowanej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Migracja zestawów kołowych zapewnia największą wartość na grubości tarczy hamulcowej tj. 0,5 mm na 10 mm na cały okres 5 lat. Najmniejszą zmianę uzyskano dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w wózku, grubość tarczy zwiększyła się tylko 0,1 mm.

Na podstawie wartości zmiany średnicy kół D i grubości tarcz hamulcowych T dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami dla wymiaru minimalnego dokonano aproksymacji przebiegów D i T z oszacowaniem wydłużenia czasu (określonego w dniach) użytkowania zestawu kołowego oraz zwiększenia przebiegu zestawu kołowego. Charakterystyki w postaci kwadratowych funkcji aproksymujących odniesiono do wymiaru rzeczywistego z przebiegu najniższej wartości D i T bez zastosowania migracji zestawów kołowych lub wózków. Na rysunkach 6.24-6.25 przedstawiono charakterystyki zmiany średnicy kół z wymiarem najniższym (wartość minimalna) w funkcji czasu i przebiegu z regresyjnymi modelami kwadratowymi dla wszystkich analizowanych koncepcji.

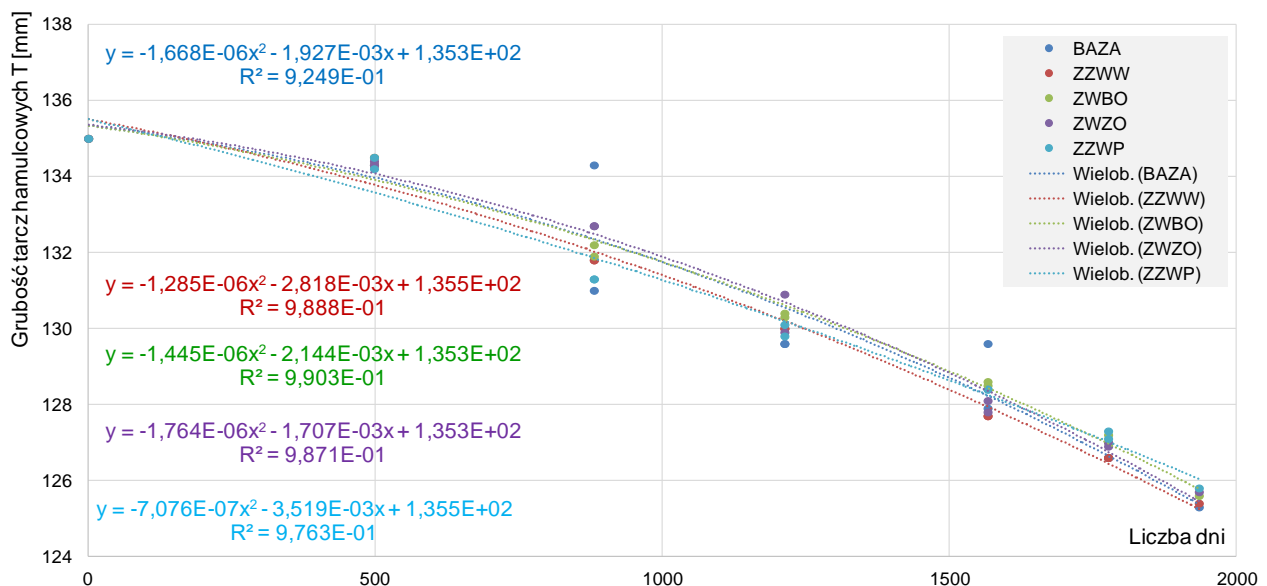


Rys. 6.24. Zależność średnicy kół o najniższym wymiarze w okręgu tocznym D dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji czasu eksploatacji pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

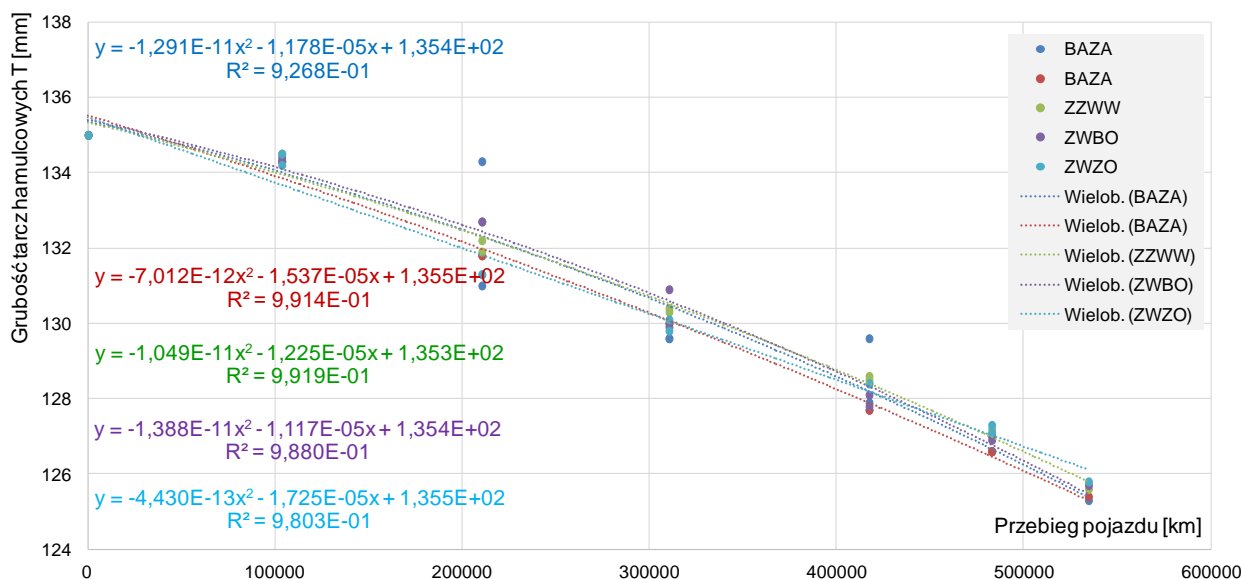


Rys. 6.25. Zależność średnicy kół o najniższym wymiarze w okręgu tocznym D dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

Natomiast na rysunkach 6.26-6.27 zaprezentowano charakterystyki zmiany wymiaru minimalnego grubości tarcz hamulcowych w zależności od czasu eksploatacji liczonego w dniach oraz w zależności od przebiegu pojazdu w kilometrach. Na wykresach podobnie jak w przypadku charakterystyk zmiany średnicy kół również przedstawiono regresyjne modele kwadratowe wymiaru minimalnego grubości tarcz dla wszystkich analizowanych koncepcji w odniesieniu do charakterystyki bazowej bez wdrożonej migracji zestawów kołowych lub wózków.



Rys. 6.26. Zależność grubości tarcz hamulcowych o najniższym wymiarze T dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji czasu eksploatacji pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi



Rys. 6.27. Zależność grubości tarcz hamulcowych o najniższym wymiarze T dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

Na podstawie regresyjnych modeli kwadratowych wymiaru D koła i grubości tarcz hamulcowych T przedstawionych na rysunkach 6.24-6.27 dokonano próby oszacowania wydłużenia czasu użytkowania i zwiększenia przebiegu pojazdu w odniesieniu do modelu bazowego nie uwzględniającego zastosowania koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. W tabelach 6.15 i 6.16 przedstawiono dłuższy czas przeliczony na dni użytkowania i wydłużenia przebiegu zestawu kołowego w kilometrach o najniższym wymiarze D lub T .

Tab. 6.15. Przyrost czasu i przebiegu pojazdu dla analizowanych koncepcji zwiększenia wymiaru minimalnego średnicy koła D w odniesieniu do podejścia bez migracji zestawów kołowych lub wózków

Koncepcja	Wymiar minimalny	Wydłużenie czasu w dniach	Zwiększenie przebiegu w [km]	Zestaw kołowy
BAZA	794,40	0	0	Z10 NP
ZZWW	802,10	270	88990	Z9 NL
ZWBO	803,50	351	120985	Z2 NP
ZWZO	805,25	403	134728	Z1 NL
ZZWP	805,40	409	136634	Z9 NP

Tab. 6.16. Przyrost czasu i przebiegu pojazdu dla analizowanych koncepcji zwiększenia wymiaru grubości tarcz hamulcowych T w odniesieniu do podejścia bez migracji zestawów kołowych lub wózków

Koncepcja	Wymiar minimalny	Wydłużenie czasu w dniach	Zwiększenie przebiegu w [km]	Zestaw kołowy
BAZA	125,3	0	0	Z7 TP(T)
ZZWW	125,4	18	5874	Z4 TP(T)
ZWBO	125,6	56	15642	Z6 TP(T)
ZWZO	125,7	61	25467	Z8 TP(T)
ZZWP	125,8	69	33219	Z3 TP(T)

Analizując dane zawarte w tabelach 6.15 i 6.16 stwierdza się, że największe wydłużenie czasu eksploatacji zestawu kołowego w zakresie średnicy D i grubości tarcz hamulcowych T oraz zwiększenia przebiegu uzyskuje się stosując metodę migracji zestawów kołowych w całym pojeździe (metoda ZZWP). Następną metodą w tym zakresie (wydłużenie czasu i

przebiegu) uzyskano przez zamianę wózków z ich obrotem (metoda ZWZO). Przy obu tych metodach dla średnicy koła D uzyskano czasy ponad 400 dni, co świadczy o dłuższej eksploatacji pojazdu przez ponad rok. W przypadku tarcz hamulcowych uzyskano zwiększenie czasu użytkowania o ponad 60 dni (do kolejnego przeglądu P2).

6.5. Podsumowanie koncepcji zarządzania zestawami kołowymi

Przeprowadzone analizy wdrożenia 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami pozwoliły na zwiększenie wartości wymiaru minimalnego, który uzyskiwał jeden z zestawów kołowych przed przeglądem P4 tj. naprawą rewizyjną. Jeden wymiar z wartością minimalną na średnicy koła lub na grubości tarczy hamulcowej zbliżony był (w szczególności w przypadku tarcz hamulcowych) do wymiaru kresowego, który wpływał na decyzję o naprawie rewizyjnej, przy znacznie wyższych pozostałych wymiarach z 19 kół. Charakterystyki zmiany średnicy kół jak i grubości tarcz hamulcowych cechowały się bardzo dużym odchyleniem standardowym od wartości średniej D lub T .

Z przeprowadzonych analiz nad 4 koncepcjami zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami stwierdzono, że:

- 1) Największe wydłużenie czasu użytkowania pojazdu jak i jego przebiegu uzyskuje się na koncepcjach uszeregowanych w następującej kolejności: migracji zestawów kołowych w całym pojeździe (koncepcja ZZWP), zamiany wózków z obracaniem (koncepcja ZWZO), zamiany wózków bez obracania (koncepcja ZWBO) oraz koncepcja zamiany zestawów kołowych w wózku (ZZWO), która również przy możliwościach konstrukcyjnych wózka tożsama jest z obrotem wózka.
- 2) Zmiana wymiaru minimalnego dla średnicy kół lub grubości tarcz hamulcowych niezależnie od wdrożonej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi jest uzależnione od liczby okresów przeznaczonych na zamianę zestawów kołowych lub wózków. Im większa liczba okresów zamiany tym większa zmiana wymiaru minimalnego dla średnicy koła D i grubości tarczy hamulcowej T .
- 3) Proces zarządzania zestawami kołowymi przynosi większy efekt w zakresie średnicy koła D niż grubości tarcz T . Związane jest to z zakresem wartości maksymalnego zużycia koła i tarczy hamulcowej. W przypadku koła wspomniany zakres wynosi 70 mm, a w przypadku grubości tarcz tylko 10 mm. Dla tarcz hamulcowych zalecane jest zwiększenie liczby okresów na zamianę zestawów kołowych lub wózków, co będzie zwiększać czasochłonność i podnosić koszty tej operacji. Najlepszymi (dogodnymi) okresami na zamianę zestawów kołowych lub wózków są przeglądy okresowe P2 z dodatkowymi planowanymi przetoczeniami zestawów kołowych.

7. OCENA ZAPROPONOWANYCH KONCEPCJI ZARZĄDZANIA ZESTAWAMI KOŁOWYMI

7.1. Ocena przydatności wyników badań

Po przeprowadzeniu zarówno badań rozpoznawczych w zakresie zużycia kół i tarcz hamulcowych na dwóch typach elektrycznych zespołów trakcyjnych stwierdzono, że dla wielocłonowych pojazdów szynowych zużycie kół czy tarcz nie jest jednakowe. W pierwszej kolejności charakter zestawu kołowego (napędny lub toczny) determinował intensywność zużycia koła lub tarczy hamulcowej. Zestawy napędne cechują się większym zużyciem na średnicy D koła względem zestawów tocznych, natomiast w przypadku tarcz hamulcowych sytuacja jest odwrotna. Zużycie powierzchni ciernej jest większe na zestawach tocznych niż ma to miejsce na zestawach napędnych. W drugim przypadku zużycie kresowe ocenionego kilkuletniej eksploatacji osiąga tylko jeden zestaw kołowych względem pozostałych, które posiadają wymiar D lub T mieszczący się w zakresie wymiaru naprawczego (eksploatacyjnego).

Przeanalizowane 4 koncepcje zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w wybranym elektrycznym zespole trakcyjnym EN76 na podstawie wyników pomiarów geometrycznych na średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych dowiodły, że możliwa zmiana wymiaru najmniejszej średnicy koła i grubości tarczy jaką uzyskiwał zestaw kołowy na ostatnim przeglądzie okresowym $P2$ stosując wszystkie zaproponowane koncepcje migracji zestawów kołowych lub wózków. Każda z 4 koncepcji szerzej opisanych w rozdziale 6 niniejszej pracy cechuje się różnym zakresem prac i pracochłonnością na jej przeprowadzenie jak również związana jest z określonymi ograniczeniami wynikającymi z założeń koncepcji. W tabeli 7.1 przedstawiono zestawienie koncepcji od najlepszej do najgorszej w zakresie spowolnienia procesu zużycia kół i tarcz hamulcowych i osiągnięcia wymiaru minimalnego po określonym czasie użytkowania względem klasycznego podejścia do utrzymania zestawów kołowych.

Tab. 7.1. Ocena koncepcji od najlepszej do najgorszej zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN76 względem podejścia klasycznego zgodnego z DSU

Lp.	Średnica koła D		Grubość tarcz hamulcowych T	
	Koncepcja	Wymiar MIN w [mm]	Koncepcja	Wymiar MIN w [mm]
1	ZZWP	805,40	ZZWP	125,80
2	ZWZO	805,25	ZWZO	125,70
3	ZWBO	803,50	ZWBO	125,60
4	ZZWW	802,10	ZZWW	125,40

Na podstawie danych zawartych w tabeli 7.1 jednoznacznie stwierdza się, że zarówno dla zmniejszenia intensywności zużycia koła na średnicy i tarcz hamulcowych na ich grubości, koncepcja ZZWP tj. zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe jest najlepsza. Uzyskano na podstawie zebranych wartości D i T z przeglądów okresowych najwyższe wartości minimalne po zastosowaniu tej koncepcji względem podejścia bez zarządzania zestawami lub wózkami. Następnie kolejnymi koncepcjami w kolejności są: koncepcja ZWZO tj., zamiany wózków z obracaniem o 180° , koncepcja ZWBO (zamiany wózków bez obracania), natomiast koncepcja ZZWW zamiany zestawów kołowych w wózków okazała się najgorsza. Należy podkreślić, że wyrażenie „najgorsza” nie oznacza uzyskanie wyników gorszych od podejścia bez zarządzania zestawami lub wózkami jak przy klasycznym podejściu zgodnym z wymaganiami w dokumentacji systemu utrzymania. Dla tej koncepcji również uzyskuje się oszczędność na zużyciu materiału koła lub tarczy hamulcowej rozumianego wymiarem minimalnym osiąganym po kilkuletnim użytkowaniu względem podejścia bez migracji zestawów lub wózków. Przyrosty wymiaru minimalnego koła na

średnicy i tarcz na jej grubości w koncepcji ZZWW są najmniejsze względem pozostałych koncepcji. Jednak uzyskuje się wyższy wymiar minimalny pozwalający na dłuższą eksploatację zestawu kołowego. Do dalszych analiz wykorzystane będą wszystkie 4 koncepcje zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami niezależnie od uzyskiwanych wyników wymiarów minimalnych kół i tarcz hamulcowych z jednoczesnym uwzględnieniem dodatkowych kryteriów związanych m.in. z szeroko rozumianą pracochłonnością na realizację koncepcji czy wyposażeniem technicznym.

7.2. Wybór kryteriów oceny i ich wartościowanie

Przydatność proponowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym przeprowadzono wykorzystując następujące kryteria ich oceny jak:

- przyrost wymiaru minimalnego średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej na ostatnim przeglądzie okresowym P2,
- czas wywiązania wózka tocznego i napędnego z pojazdu szynowego,
- czas transportu wózka tocznego i napędnego w inne miejsce na pojeździe,
- czas obrócenia wózka tocznego i napędnego o 180°,
- czas demontażu zestawu kołowego z wózka tocznego i napędnego,
- czas transportu zestawu kołowego (tocznego i napędnego) z jego odstawieniem,
- czas montażu zestawu kołowego (tocznego i napędnego) w inne miejsce na wózku,
- czas montażu wózka tocznego i napędnego na pojeździe,
- wymagane narzędzia do przeprowadzenia demontażu i ponownego montażu zestawu kołowego lub wózków,
- wymagane urządzenia podnośnikowe lub dźwigowe,
- liczba osób niezbędnych do przeprowadzenia danej koncepcji,
- kosztu pracy do realizacji danej koncepcji.

Pierwszym kryterium oceny analizowanych koncepcji jest wzrost wymiaru minimalnego średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej jaki uzyskałby jeden z 10 zestawów kołowych na ostatnim przeglądzie okresowym P2 względem klasycznego podejścia do utrzymania zestawów kołowych. Wzrost wymiaru minimalnego w ujęciu ilościowym (w mm) i jakościowym (w %) dla średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych zawarto w tabeli 7.2.

Tab. 7.2. Wzrost wymiaru minimalnego średnicy koła D i grubości tarczy T po wdrożeniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami względem podejścia klasycznego zgodnego z DSU

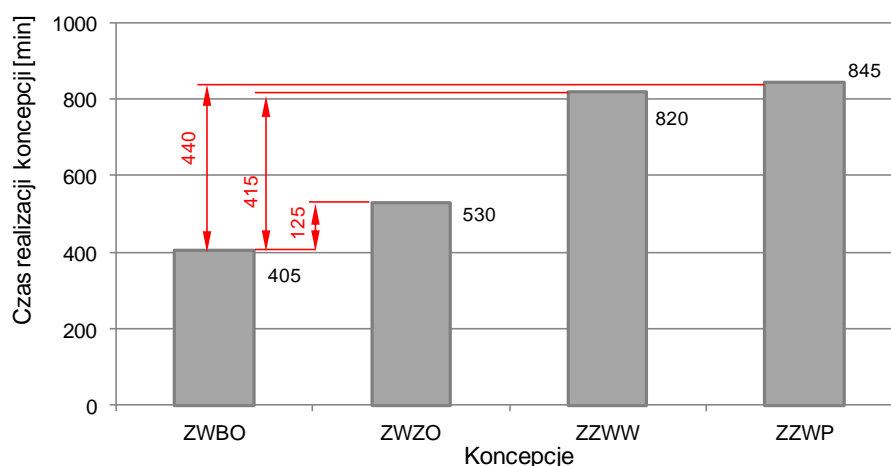
Lp.	Średnica koła D			Grubość tarcz hamulcowych T		
	Koncepcja	[mm]	[%]	Koncepcja	[mm]	[%]
1	ZZWP	11,00	15,7	ZZWP	0,5	5,0
2	ZWZO	10,85	15,5	ZWZO	0,4	4,0
3	ZWBO	9,10	13,0	ZWBO	0,3	3,0
4	ZZWW	7,70	11,0	ZZWW	0,1	1,0

Drugim kryterium oceny analizowanych koncepcji jest czas przeprowadzenia danej koncepcji do zamiany zestawów kołowych lub wózków. Na ten czas składają się takie czynności jak podniesienie całego pojazdu, demontaż wózków napędnych i tocznych, transport wózków, obrót wózka (dla koncepcji ZWZO), demontaż zestawów kołowych napędnych lub tocznych z wózka, transport (przetoczenie) zestawu kołowego, ponowny montaż zestawów kołowych w wózku oraz montaż wózków na pojeździe z jednoczesnym opuszczeniem członów nadwozia elektrycznego zespołu trakcyjnego. W tabeli 7.3 przedstawiono poszczególne czasy dla wymienionych czynności dla wszystkich analizowanych koncepcji.

Tab. 7.3. Czasy poszczególnych czynności realizacji analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN76

Czynność	Koncepcja											
	ZWBO zamiany wózków bez obracania			ZWZO zamiany wózków z obracaniem			ZZWW zamiany zestawów w wózku			ZZWP zamiany zestawów w pojeździe		
Czas podniesienia EZT	10 min											
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	Czas [min]	Liczba wózków	Iloczyn $a \times b$	Czas [min]	Liczba wózków	Iloczyn $a \times b$	Czas [min]	Liczba wózków	Iloczyn $a \times b$	Czas [min]	Liczba wózków	Iloczyn $a \times b$
Wywiązanie wózka napędowego	45	2	90	45	2	90	45	2	90	45	2	90
Wywiązanie wózka tocznego	30	3	90	30	3	90	30	3	90	30	3	90
Transport wózka	5	5	25	10	5	50	10	5	50	10	5	50
Obrót wózka	-	-	-	20	5	100	-	-	-	-	-	-
Demontaż zestawu kołowego w wózku napędowym	-	-	-	-	-	-	40	2	80	40	2	80
Demontaż zestawu kołowego w wózku tocznym	-	-	-	-	-	-	30	3	90	30	3	90
Transport zestawu i jego odstawienie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	25
Montaż zestawu kołowego w inne miejsce na wózku nap.	-	-	-	-	-	-	50	2	100	50	2	100
Montaż zestawu kołowego w inne miejsce na wózku tocz.	-	-	-	-	-	-	40	3	120	40	3	120
Montaż wózka napędowego	45	2	90	45	2	90	45	2	90	45	2	90
Montaż wózka tocznego	30	3	90	30	3	90	30	3	90	30	3	90
Czas opuszczenia EZT	10 min											
SUMA [min]	405			530			820			845		

Na rysunku 7.1 przedstawiono graficznie całkowity czas wyrażony w minutach na realizację poszczególnych koncepcji wraz z różnicami względem koncepcji ZWBO tj. zamiany wózków bez obracania. Ta koncepcja wykazała najkrótszy czas jej realizacji.



Rys. 7.1. Zestawienie całkowitych czasów realizacji koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami, kolorem czerwonym zaznaczono różnice czasowe w minutach względem koncepcji ZWBO

Trzecim kryterium oceny analizowanych koncepcji są kwestie techniczne związane z wymaganymi narzędziami ręcznymi i urządzeniami podnośnikowymi. W zakresie samych narzędzi ręcznych w każdej analizowanej koncepcji konieczne jest użycie tych samych zestawów kluczy zwykłych, nasadowych czy kluczy dynamometrycznych. Podczas analiz w tym zakresie nie stwierdzono różnic związanych z narzędziami ręcznymi przy wykonaniu danej koncepcji. Jedynie w zakresie urządzeń podnośnikowych stwierdzono, że trzy koncepcje takie jak ZWZO, ZZWW i ZZWP wymagają dodatkowej suwnicy bramowej do podniesienia wózka w celu jego obrócenia oraz podniesienia wózka w celu wywiązania i wytoczenia zestawów kołowych. Każda z koncepcji oprócz wspomnianej suwnicy wymaga podnośników kolejowych typu Kutruffa do podniesienia nadwozi zespołów trakcyjnych oraz zdalnie sterowanych pojazdów elektrycznych do wytoczenia wózków spod pojazdu. Zestawienie urządzeń podnośnikowych i dźwigowych dla realizacji danej koncepcji przedstawiono w tabeli 7.4.

Tab. 7.4. Zestawienie urządzeń podnośnikowych i dźwigowych dla wdrożenia realizacji danej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami

Koncepcja	ZWBO	ZWZO	ZZWW	ZZWP
Urządzenia podnośnikowe i dźwigowe	- podnośniki kolejowe Kutruffa, - pojazd elektryczny zdalnie sterowany.	- podnośniki kolejowe Kutruffa, - pojazd elektryczny zdalnie sterowany, - suwnica bramowa.	- podnośniki kolejowe Kutruffa, - pojazd elektryczny zdalnie sterowany, - suwnica bramowa.	- podnośniki kolejowe Kutruffa, - pojazd elektryczny zdalnie sterowany, - suwnica bramowa.

Czwartym kryterium oceny analizowanych koncepcji jest liczba pracowników technicznych do przeprowadzenia danej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Minimalna liczba pracowników dla każdej koncepcji to 4 osoby do pracy przy demontażu układów elektrycznych, pneumatycznych i innych na wózkach tocznych i napędnych. Natomiast do pracy przy obsłudze suwnicy bramowej niezbędny jest kolejny pracownik jak również podczas prac z montażem zawiesia łańcuchowego 4-cięgnowego na ramie wózka i jego obrotu, konieczny jest kolejny pracownik. Zestawienie pracowników do realizacji poszczególnych koncepcji zawarto w tabeli 7.5.

Tab. 7.5. Zestawienie liczby pracowników do realizacji danej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami

Koncepcja	ZWBO	ZWZO	ZZWW	ZZWP
Liczba pracowników	4	6	5	5

Piątym ostatnim kryterium oceny analizowanych koncepcji jest koszt pracy realizacji danej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Ten koszt jest wynikiem takich składowych jak czasu wykonania danej koncepcji, liczby pracowników i stawki za godzinę pracy pracownika (rbg). Nie uwzględniono kosztu zakupu narzędzi i urządzeń technicznych, gdyż jest to zakup jednorazowy. Założono długi okres pracy bezawaryjnej bez dodatkowych kosztów na ich utrzymanie. Zakłady naprawcze taboru kolejowego dla realizacji planowych zgodnie z DSU prac związanych z obsługą, serwisem czy naprawą zmuszone są do zakupu tych narzędzi i urządzeń. Na podstawie zależności (8.1) obliczono dla każdej koncepcji koszt jej realizacji.

$$K_{RK,(...)} = T_{RK,(...)} \cdot L_{prac,(...)} \cdot S_{RK}$$

$$K_{RK,(ZWBO)} = T_{RK,(ZWBO)} \cdot L_{prac,(ZWBO)} \cdot S_{RK} = \frac{405}{60} \cdot 4 \cdot 28,10 = 758,70 [\text{zł}], \quad (8.1)$$

gdzie: T_{RK} – czas realizacji danej koncepcji, [h],
 L_{prac} – liczba pracowników do realizacji danej koncepcji,
 S_{RK} – stawka za roboczogodzinę, [zł/h].

Do obliczeń założono minimalną stawkę godzinową brutto w wysokości 28,10 zł, która zgodnie z [22] obowiązuje od 1 lipca 2024 r. W tabeli 7.6 przedstawiono koszty realizacji danej koncepcji.

Tab. 7.6 Koszty realizacji analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym

Koncepcja	ZWBO	ZWZO	ZZWW	ZZWP
Kosz jednorazowej koncepcji [zł]	758,70	1489,30	1920,17	1978,71

Analizując koszty wdrożenia koncepcji obserwuje się niewielkie różnice (około 50 zł) między koncepcjami ZZWW i ZZWP, mimo, że są to najdroższe koncepcje zarządzania zestawami kołowymi.

7.3. Analiza przydatności koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami

Kryteria oceny analizowanych czterech koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w EZT zebranych i przeanalizowanych w podrozdziale 7.2 i możliwych do wdrożenia w zakładach naprawczych taboru kolejowego dla wydłużenia czasu użytkowania zestawów kołowych w zakresie średnicy kół D i grubości tarcz hamulcowych T , zostały wraz z zaproponowanym wartościowaniem przedstawione w tabeli 7.7.

Tab. 7.7. Kryteria oceny i wartościowanie dla poszczególnych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym

KONCEPCJE ZARZĄDZANIA ZESTAWAMI KOŁOWYMI LUB WÓZKAMI W EZT			1		2	3	4	5
			Zmiana wymiaru [%]		Czas realiz. koncepcji [min]	Wyposaż. techniczne WT	Liczba pracow.	Koszt koncepcji [zł]
			D	T				
1	Zamiana wózków bez obracania	ZWBO	13,0	3,0	405	2	4	758,70
2	Zamiana wózków z obracania	ZWZO	15,5	4,0	530	3	6	1489,30
3	Zamiana zestawów kołowych w wózku	ZZWW	11,0	1,0	820	3	5	1920,17
4	Zamiana zestawów kołowych w pojeździe	ZZWP	15,7	5,0	845	3	5	1978,71

Wskazanie najlepszych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami związane jest z rozwiązaniem problemów decyzyjnych, bazujących na wybranych kryteriach oceny. W tym celu zaproponowano zastosowanie specjalnej metody programowania wielokryterialnego, uwzględniając mnogość funkcji celu [116]. Porządkowanie (agregację) kryteriów decyzyjnych przeprowadzono stosując Metodę Unitaryzacji Zerowej (MUZ) [44].

Tab. 7.8. Zestawienie wartościowania dla analizowanych wariantów tj. koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w EZT

Warianty	Cechy (zmiennie)					
	X1		X2	X3	X4	X5
	X1.1	X1.2				
W1	13,0	3,0	405	2	4	758,70
W2	15,5	4,0	530	3	6	1489,30
W3	11,0	1,0	820	3	5	1920,17
W4	15,7	5,0	845	3	5	1978,71
Max x_{ij}	15,7	5,0	845	3	6	1978,71
Min x_{ij}	11,0	1,0	405	2	4	758,70

W – warianty koncepcje zarządzania zestawami kołowymi,
X – zmiennie, kryteria oceny wariantów.

Założono cztery różne warianty w rozumieniu analizowanych koncepcji. Warianty scharakteryzowano za pomocą pięciu cech (zmiennych). Wartości charakterystyk wariantów zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami, z uwzględnieniem wartości minimalnej i maksymalnej dla danej cechy, przedstawiono w tabeli 7.8 jednocześnie dla zarządzania zestawami kołowymi w zakresie wydłużenia przebiegu pojazdu dla średnicy koła D i grubości tarczy hamulcowej T .

W pierwszej kolejności rozwiązanie problemu decyzyjnego wymagało rozpoznania zmiennych dla analizowanych koncepcji. Stymulanta wskazuje na zalecane wyższe wartości dla danego wariantu, natomiast destymulanta określa niższe wartości zalecane dla wariantu diagnostycznego. Stymulantę stanowi tylko jedna cecha – $X1$, ponieważ została ona opisana wzrostem wymiaru na średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych w milimetrach lub w procentach względem podejścia klasycznego bez zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Pozostałe cechy są destymulantami i związane są z czasem realizacji koncepcji, liczby urządzeń technicznych, liczby pracowników oraz kosztami przeprowadzenia danej koncepcji. Te cechy wymagają najniższych wartości.

Normowanie zmiennej (cechy) obliczono na podstawie zależności (7.2) i (7.3) [135]:
Dla stymulanty:

$$z_{ij,S} = \frac{x_{ij} - \min \cdot x_{ij}}{\max \cdot x_{ij} - \min \cdot x_{ij}} \quad (7.2)$$

$$z_{W1,Z1,S} = \frac{13-11}{15,7-11} = 0,426$$

Dla destymulanty:

$$z_{ij,D} = \frac{\max \cdot x_{ij} - x_{ij}}{\max \cdot x_{ij} - \min \cdot x_{ij}}, \quad (7.3)$$

$$z_{W1,Z2,D} = \frac{845-405}{845-405} = 1,0$$

gdzie: z_{ij} – i-ta wartość unormowanej j-jej zmiennej,
 x_{ij} – wartość danej cechy (zmiennej).

Ostatnim etapem metody *MUZ* było obliczenie wartości zmiennej agregatywnej, która charakteryzuje analizowane koncepcje (warianty) ze względu na kryteria tj. cechy. Obliczenie wartości zmiennej agregatywnej dla każdego wariantu oraz zmiennej dokonano, stosując zależność (7.4) [135]:

$$Q_i = \sum_j z_{ij} \quad (7.4)$$

gdzie: Q_i – wartość zmiennej agregatywnej przypisanej do i-tego wariantu.

W tabeli 7.9 oraz 7.10 zestawiono wyniki normowania dla rozpatrywanych wariantów, natomiast w tabeli 7.11 przedstawiono ranking i wybór najlepszych wariantów tj. koncepcji do zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami.

Tab. 7.9. Zestawienie wyników normowania dla rozpatrywanych wariantów zarządzania zestawami kołowymi w celu zwiększenia wymiaru minimalnego średnicy koła D względem podejścia bez stosowania koncepcji

Warianty	Unormowane zmienne					$Q_{i,D}$
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	
W1	0,426	1	1	1	1	4,426
W2	0,957	0,716	0	0	0,401	2,075
W3	0,000	0,057	0	0,5	0,048	0,605
W4	1	0	0	0,5	0	1,500

Tab. 7.10. Zestawienie wyników normowania dla rozpatrywanych wariantów zarządzania zestawami kołowymi w celu zwiększenia wymiaru minimalnego grubości tarcz hamulcowych T względem podejścia bez stosowania koncepcji

Warianty	Unormowane zmienne					$Q_{i,T}$
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	
W1	0,500	1	1	1	1	4,500
W2	0,750	0,716	0	0	0,401	1,867
W3	0	0,057	0	0,5	0,048	0,605
W4	1	0	0	0,5	0	1,500

Tab. 7.11. Ranking i wybór najlepszych koncepcji (wariantów) do zarządzania w zakresie D i T

Koncepcja	Wariant	$Q_{i,D}$	$Q_{i,T}$	Ocena
Zamiana wózków bez obracania	W1	4,426	4,500	Max*
Zamiana wózków z obracania	W2	2,075	1,867	
Zamiana zestawów kołowych w pojeździe	W4	1,500	1,500	max**
Zamiana zestawów kołowych w wózku	W3	0,605	0,605	
* najlepszy wariant dla zarządzania wózkami kolejowymi, ** najlepszy wariant dla zarządzania zestawami kołowymi.				

Po przeprowadzeniu analizy wielokryterialnej metodą *MUZ* stwierdzono, że do celów zwiększenia wymiaru minimalnego zarówno średnicy kół jak i grubość tarcz hamulcowych, uwzględniając wszystkie kryteria związane z czasem, wyposażeniem technicznym, liczbą pracowników oraz kosztem przeprowadzenia koncepcji, najlepszym wariantem jest metoda zamiany wózków bez ich obracania. W obu rozpatrywanych przypadkach tj. dla zwiększenia wymiaru minimalnego średnicy koła i grubości tarcz hamulcowych stwierdzono najwyższe wartości zmiennych agregatowych. Na drugim miejscu jest koncepcja zamiany wózków z ich obracaniem. Należy podkreślić, że różnice w wartościach zmiennej agregatywnej Q_i między wariantem $W1$, a $W2$ są znaczące (ponad dwukrotna wartość Q_i dla wariantu $W2$ względem $W1$). Na podstawie analiz i obliczeń obserwuje się, że warianty $W2$ i $W4$ posiadają niewielkie różnice w zmiennej agregatywnej.

7.4. Przykład algorytmu zarządzania zestawami kołowymi

Celem proponowanych metod zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami jest w przypadku kół, które wykazują największe zużycie na średnicy D oraz na grubości tarczy hamulcowej T jest zmiana ich wymiaru przez przestawienie tego koła w miejsce koła o najmniejszym zużyciu. W tej sytuacji koła w miejscach o największym zużyciu nie osiągają kresowego zużycia tak szybko, jak miałyby to miejsce w klasycznej metodzie obsługi zestawów kołowych wynikającej z zapisów DSU. Analiza 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi, szerzej opisana w rozdziale 6 pracy dowiodła, że każda z koncepcji migracji zestawów kołowych lub wózków pozwala w różnym stopniu na tzw. „spowolnienie” procesu zużycia na tych zestawach, w których ten proces przebiegał najszybciej. Należy podkreślić, że w przypadku zestawów kołowych o największym zużyciu koncepcje zarządzania pozwalają „na spowolnienie” procesu zmiany wymiaru D lub T , a tym samym zużycia. Natomiast w przypadku zestawów o najmniejszym zużyciu, koncepcje zarządzania zwiększają proces zużycia średnicy kół lub tarcz hamulcowych. Najlepiej jest to widoczne poprzez odchylenie standardowe od wartości średniej średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej, które jest wielokrotnie mniejsze w zależności od typu zestawu kołowego od metody bez stosowania zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Koncepcje migracji zestawów kołowych lub wózków przedstawione są za pomocą opracowanego algorytmu z kolejnością działań w celu zmiany (podniesienia) wymiaru minimalnego średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej na kolejnym przeglądzie okresowym.

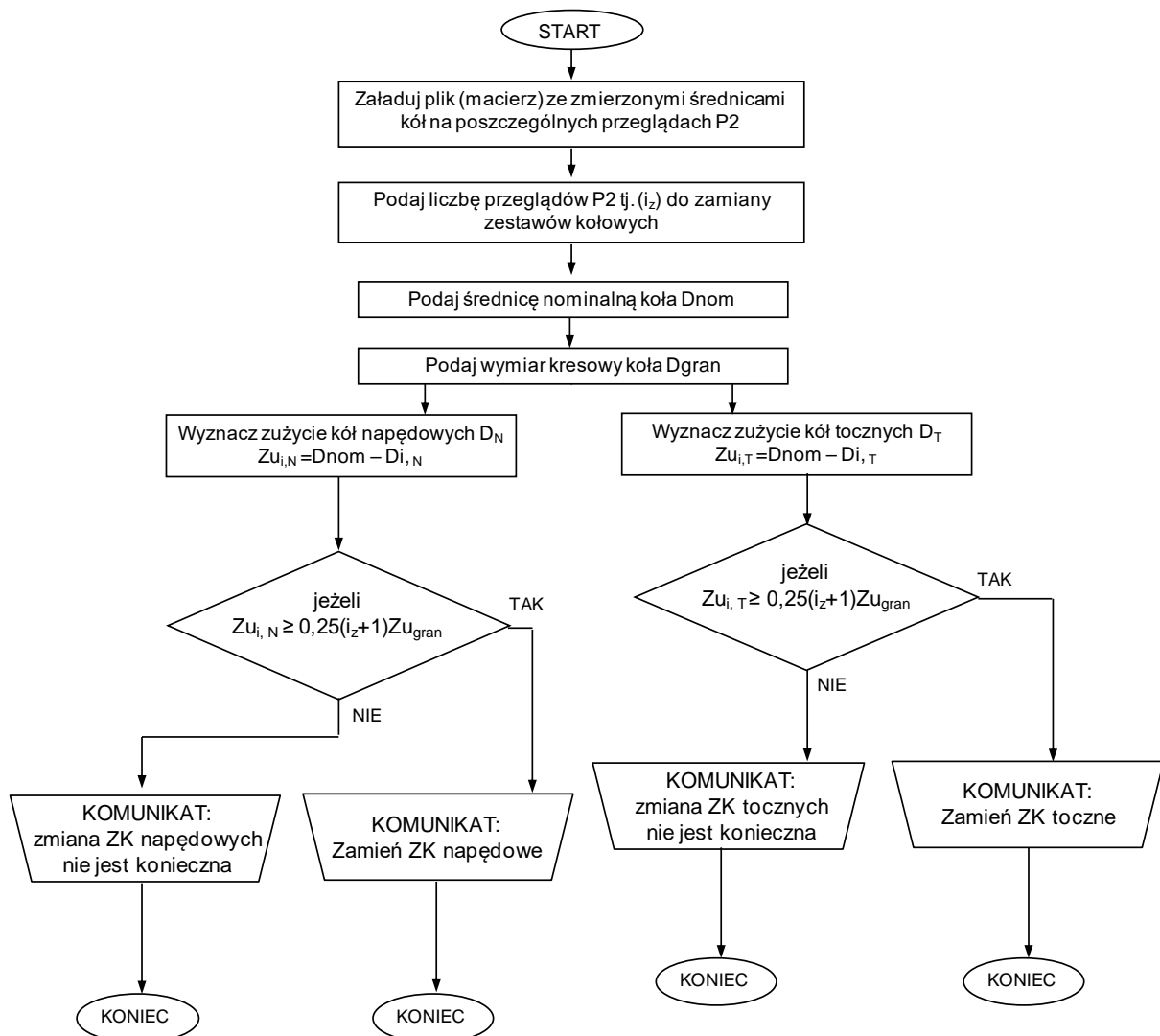
Słowo algorytm wywodzi się z języka arabskiego i oznacza sposób (metodę) rozwiązania określonego zadania. W algorytmie znajduje się początek i koniec jak również nazwy poszczególnych działań, na których wykonuje się operacje z zachowaniem porządku ich wykonania [23].

Zgodnie z ogólnymi warunkami badań [50] dopuszczalne graniczne zużycie kół kolejowych wynosi 70 mm, a tarcz hamulcowych 10 mm. Proponowane metody (koncepcje) zmieniają wymiar średnicy koła i grubości tarczy, co zostało dowiedzione na podstawie badania z kilkuletniej eksploatacji elektrycznych zespołów trakcyjnych EN76. Określenie zmiany wymiaru średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej w opracowanych metodach dokonano poprzez prognozowanie (ekstrapolację) dalszego wymiaru na podstawie regresyjnych modeli opisanych i przedstawionych na rysunku 6.24 – 6.27 w funkcji czasu wyrażonej w dniach oraz przebiegu elektrycznego zespołu trakcyjnego.

Opracowane w pracy regresyjne modele, opisujące zmiany takich parametrów geometrycznych zestawu kołowego jak średnica kół i grubość tarcz hamulcowych oraz modele zużycia w funkcji czasu i przebiegu oraz zużycia tych parametrów (opisanych w rozdziale 4), pozwoliły na zaproponowanie algorytmów dla realizacji koncepcji zarządzania

zestawami kołowymi lub wózkami. Przeprowadzone analizy 4 koncepcji na podstawie zebranych danych z eksploatacji elektrycznych zespołów trakcyjnych oraz modeli regresyjnych, umożliwiły na prognozowanie trendu i dalszej zmiany wymiaru D lub T z określeniem chwili czasowej osiągnięcia kresowego wymiaru, a tym samym zużycia w zależności od zastosowanej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami.

Mając na uwadze fakt, że montaż zestawów kołowych czy wózków w czasie eksploatacji nie może być przypadkowy w programie Matlab 2024 opracowano metodę pozycjonowania kół na pojeździe opartą na założeniach strategii eksploatacji wykorzystującej znajomość stanu technicznego obiektów (wspomaganej diagnostyką techniczną). W pierwszej kolejności należy opracować algorytm decyzyjny dotyczący konieczności zmiany zestawów kołowych lub wózków w pojeździe. Biorąc pod uwagę założenie stałej szybkości zużywania kół stwierdzono, że zmiany kół należy dokonać gdy zużycie chociaż jednego koła będzie większe o określoną wartość względem zużycia granicznego. Z punktu naukowego przy założeniu zużycia wynoszącego 25% zużycia granicznego do połowy czasu eksploatacji teoretycznie wartości zużycia wyrównają się na wszystkich zestawach kołowych. Na rysunku 7.2, przedstawiono schemat algorytmu decyzyjnego pozwalającego określić konieczność przeprowadzenia zamiany zestawów kołowych lub wózków w kolejnych przeglądach okresowych na podstawie pliku z macierzą wartości średnic kół lub grubości tarcz hamulcowych. Algorytm decyzyjny (sieć działań) oparto na analizie zbiorów zużycia kół zestawów tocznych i napędnych. W algorytmie założono konieczność przeprowadzenia zamiany zestawów kołowych jeżeli zużycie kół podczas danego przeglądu $P2$ osiągnie lub przekroczy 25% zużycia granicznego. Jednak w przyszłości ze względów praktycznych decyzja o konieczności przeprowadzenia zamiany będzie uzależniona od wykonania przetoczenia profilu koła lub tarczy ze względu na wady powierzchni i niezachowanie profilu UIC koła i dopuszczalnej falistości powierzchni ciernej tarczy hamulcowej.



Rys. 7.2 Algorytm decyzyjny konieczności przeprowadzenia zamiany zestawów kołowych lub wózków;
ZK – zestaw kołowy (toczny lub napędowy)

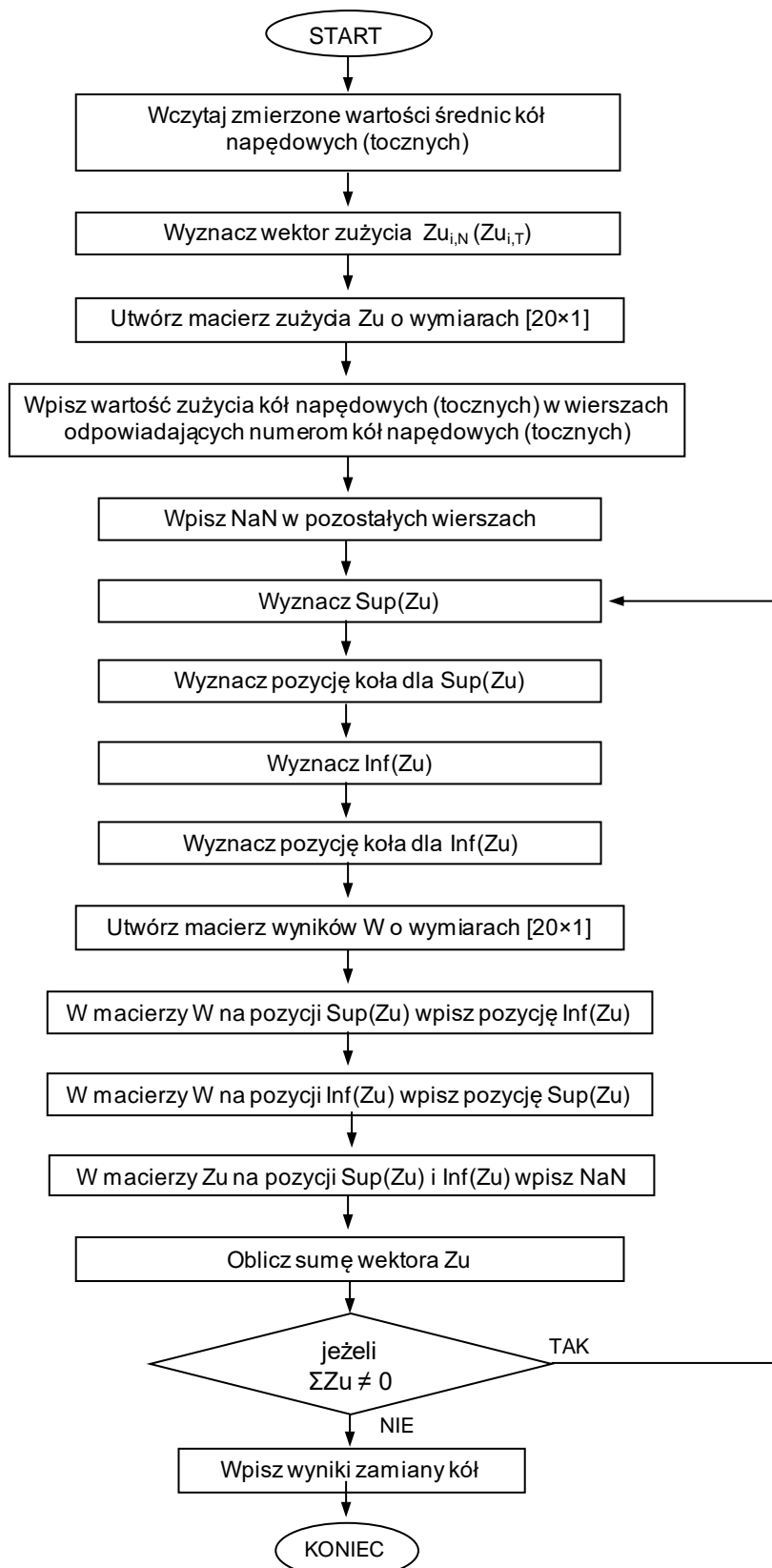
Procedura (osobna dla zestawów kołowych napędowych i tocznych) działania algorytmu decyzyjnego zamiany ZK oparta jest na podstawowym założeniu tj. maksymalizacja czasu eksploatacji zestawów kołowych poprzez wykorzystanie potencjału kół zużywających się wolniej i wymaga wykonania następujących działań:

- 1) zmierz średnice kół napędowych (tocznych),
- 2) wczytaj zmierzone średnice kół,
- 3) wyznacz zużycie kół,
- 4) utwórz wektor zużycia Z_u o wymiarach $[20 \times 1]$,
- 5) wpisz wartości zużycia kół napędowych (tocznych) w wierszach odpowiadających numerom kół napędowych,
- 6) wpisz NaN w pozostałych wierszach wektora zużycia,
- 7) wyznacz: $\sup(Z_u)$,
- 8) wyznacz pozycję koła dla $\sup(Z_u)$,
- 9) wyznacz: $\inf(Z_u)$,
- 10) wyznacz pozycję koła dla $\inf(Z_u)$,
- 11) utwórz macierz wyników W o wymiarach $[20 \times 1]$,
- 12) w macierzy W na pozycji $\sup(Z_u)$ wpisz pozycję $\inf(Z_u)$,
- 13) w macierzy W na pozycji $\inf(Z_u)$ wpisz pozycję $\sup(Z_u)$,

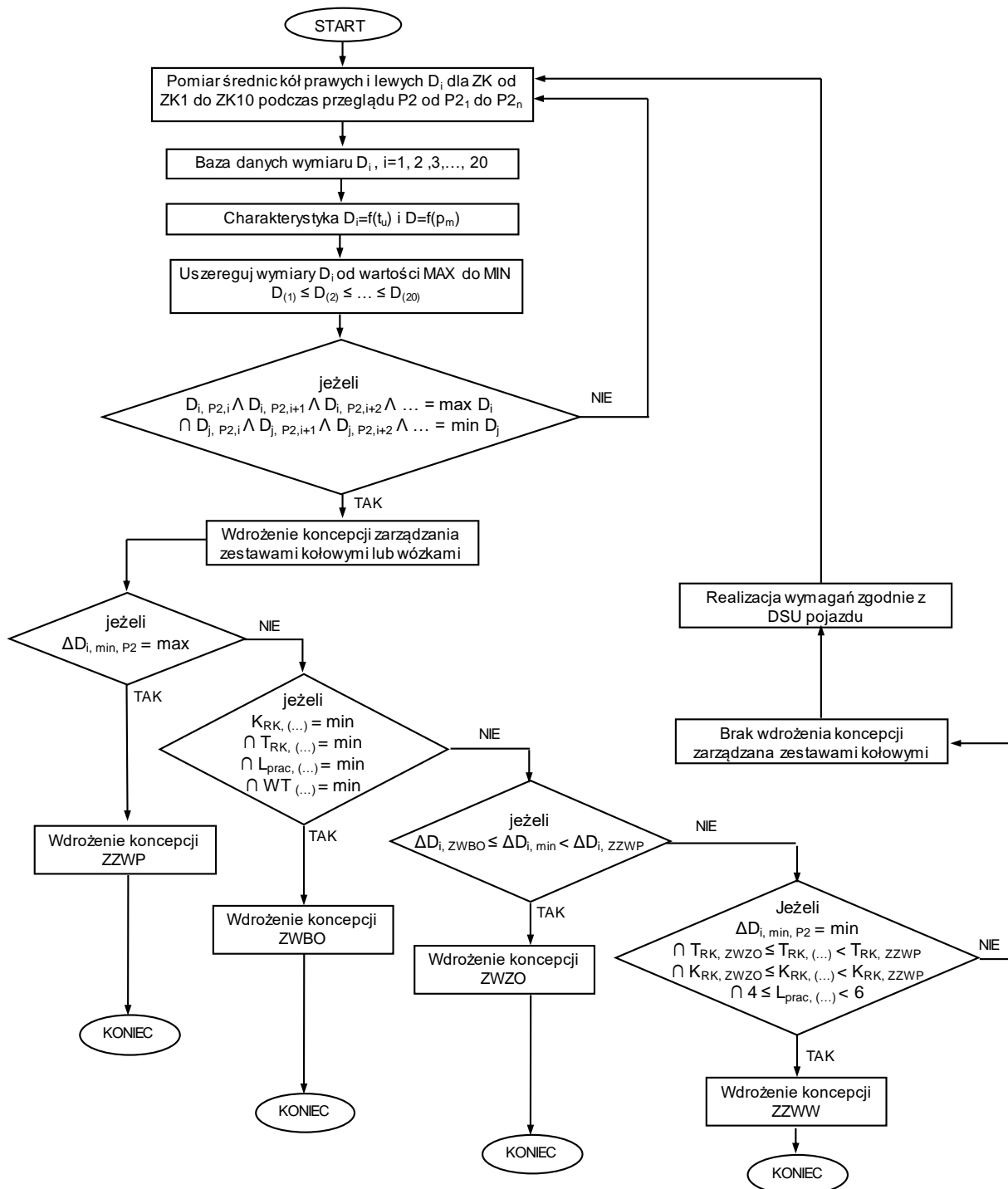
- 14) w macierzy Z_u na pozycji $\sup(Z_u)$ i $\inf(Z_u)$ wpisz NaN,
- 15) oblicz sumę wektora Z_u ,
- 16) powtarzaj procedurę do momentu gdy suma $Z_u = 0$,
- 17) wypisz wyniki zamiany kół.

Procedura zapisana zastała w programie Matlab 2024 i zamieszczona w załączniku niniejszej pracy. Na rysunku 7.3 przedstawiono w sposób graficzny procedurę zamiany kół zestawów kołowych w kolejności od największego zużycia w pozycje kół o najmniejszym zużyciu. Po realizacji pierwszej procedury decyzyjnej, zaproponowano dwa bliźniacze kolejne algorytmy dla realizacji 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Pierwszy algorytm dotyczy metody zmniejszenia intensywności zużycia kół o najmniejszej średnicy, drugi algorytm analogicznie dotyczy spowolnienia procesów zużycia dla tarcz hamulcowych o najmniejszej grubości.

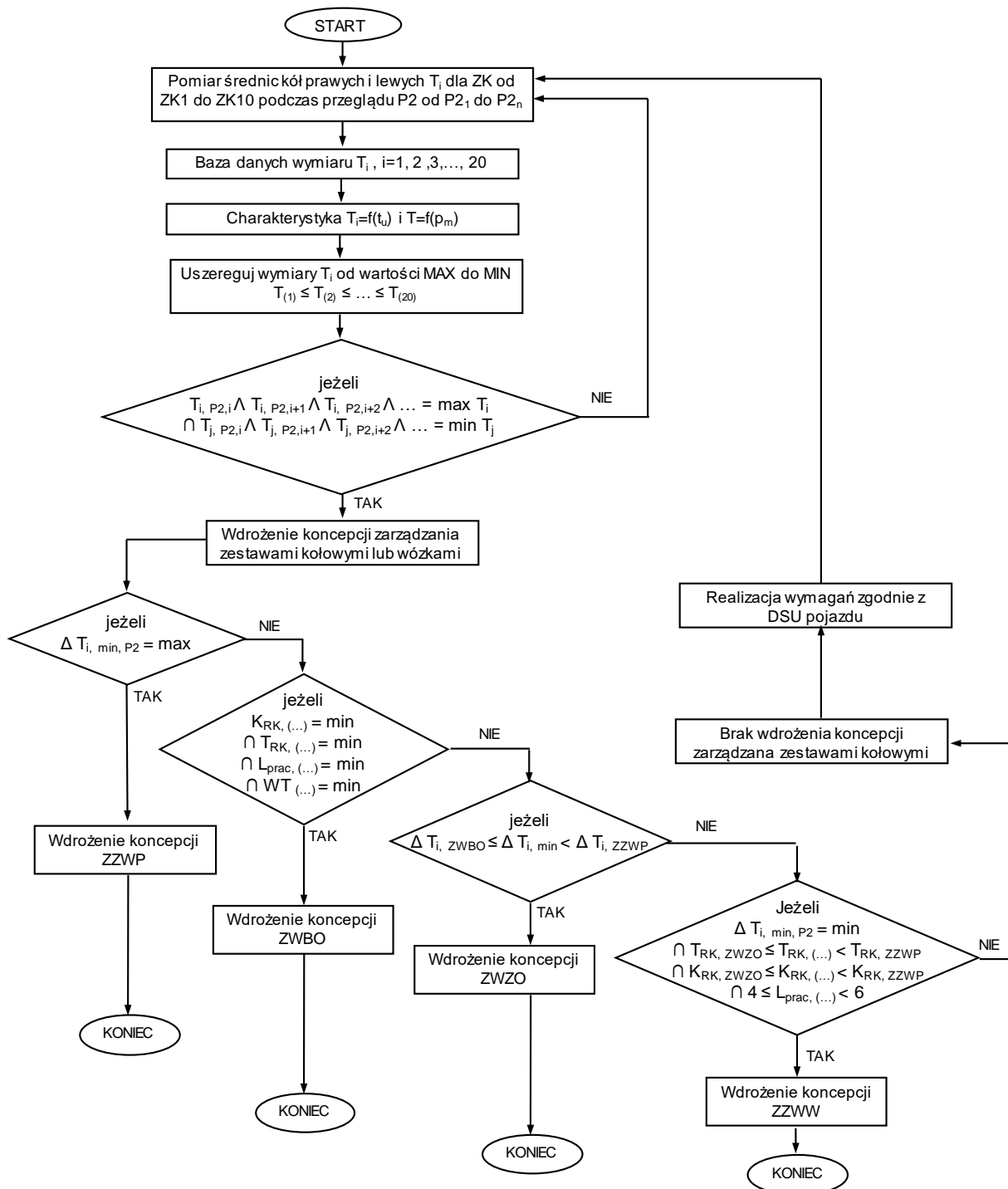
Na rysunku 7.4 zaprezentowano algorytm zmniejszenia intensywności zużycia kół kolejowych o najmniejszej średnicy D stwierdzanej podczas przeglądów okresowych P_2 , natomiast na rysunku 7.5 przedstawiono algorytm zmniejszający intensywność zużycia tarcz hamulcowych na tych zestawach, które osiągały wymiar minimalnej grubości w czasie okresowych przeglądów poziomu P_2 . Na algorytmach zaznaczono możliwość realizacji wszystkich koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami mimo, że w zakresie przyrostu wymiaru średnicy koła i grubości tarczy hamulcowej najlepszą koncepcją okazała się metoda *ZZWP* migracji zestawów kołowych w całym pojeździe. Ta metoda z punktu oceny wszystkich kryteriów (czasowych, technicznych, organizacyjnych i kosztowych) okazała się najbardziej pracochłonna w stosunku do metody (koncepcji) *ZWBO* tj. zamiany wózków bez obracania. Wspomniana metoda okazała się najmniej pracochłonna względem innych koncepcji, natomiast z punktu eksploatacyjnego tj. zmiany wymiaru na średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej ta metodą jest na trzecim miejscu z czterech analizowanych koncepcji.



Rys. 7.3. Algorytm zamiany kół zestawów kołowych (toczny lub napędowy) napisany w programie Matlab 2024.



Rys. 7.4. Algorytm zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w celu zmniejszenia intensywności zużycia kół na średnicy D ; WT – wyposażenie techniczne



Rys. 7.5. Algorytm zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w celu zmniejszenia intensywności zużycia tarcz hamulcowych na ich grubości T ; WT – wyposażenie techniczne

7.5. Propozycje zmian w konstrukcji układu biegowego pojazdu szynowego

Propozycje zmian w układzie biegowym elektrycznego zespołu trakcyjnego dotyczą wózków tocznych i napędnych w zakresie ich konstrukcji i wyposażenia. Każda z koncepcji (metod) zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami będzie wymagała dodatkowych czynności, które w ujęciu czasowym zostały przedstawione w tabeli 7.3.

Natomiast w szerszym sensie należy podczas migracji zestawów kołowych wózków zwrócić szczególną uwagę na:

- 1) Każdorazowy demontaż czujników przeciwpoślizgu zestawów kołowych (rys. 7.6) i uszynienia wraz z czujnikami Halla i ich kołem zębatym wraz z zestawem kołowym w inną lokalizację. Wynika to z faktu, że wymienione czujniki dopasowane i kalibrowane były pod dany zestaw kołowy i nie zalecany jest ich montaż na innej maźnicy (obudowie łożysk).



Rys. 7.6. Widok wózka z urządzeniami przeciwpoślizgu oraz jednym zestawem do piaskowania pierwszego zestawu kołowego [fot. A.M. Rilo Cañás],

- 2) Dodatkową migrację zacisków hamulcowych z okładzinami (bloków hamulcowych) wraz z przemieszczaniem zestawów kołowych w inne miejsce na wózku lub na pojeździe. Ze względu na parę cierną jaka tworzą dotarte okładziny cierne względem tarcz hamulcowych, również nie wskazana jest migracja zestawów kołowych w inne lokalizacje na wózku lub na pojeździe z zamocowanymi zaciskami hamulcowymi na ramie wózka. Pozostawienie bloków hamulcowych na ramie wózka po demontażu zestawu kołowego z dotartymi tarczami hamulcowymi sprawi, że w przypadku innego zestawu kołowego rozpocznie się proces docierania długotrwałego okładzin ciernych, co wpłynie na zmniejszenie skuteczności hamulca i wydłużenie drogi hamowania w pierwszym okresie pracy hamulca. W przypadku zestawów napędnych proces docierania tarcz hamulcowych względem okładzin będzie znacznie dłuższy niż w przypadku zestawów tocznych.

W przypadku koncepcji ZWZO związanej z migracją i jednoczesnym obrotem wózka należy zwrócić uwagę na następujące kwestie:

- 1) Zgarniacze mocowane na czołownicy wózka napędowego przy pierwszym zestawie kołowym, również powinny mieć możliwość montażu do dodatkowych mocowań z drugiej strony wózka przy drugim zestawie kołowym. Konstrukcja ramy wózka powinna uwzględnić mocowanie zgarniaczy z dwóch stron.
- 2) Dysze piasecznic wraz z przewodami i zbiornikami, które mocowane są na wszystkich lub pierwszych napędowych zestawach kołowych (rys. 7.6 fioletowa strzałka) zgodnie z kierunkiem jazdy również powinny mieć możliwość mocowania do dodatkowych uchwytów na ramie przy drugich zestawach kołowych wózków napędnych. Po obrocie wózka o 180° na czołownicy lub w narożnikach ramy muszą znajdować się dodatkowe mocowania do montażu układu piasecznic.
- 3) Konstrukcja wózka powinna być symetryczna również ze względu na poziome tłumiki wężykowania, które w starszych konstrukcjach wózków mocowane są wzdłuż wózka mocowane jednym końcem na podłe i drugim końcem na wózku na jego przedniej lub tylnej części podłużnicy. W celu obracania wózka o 180° konieczne jest centralne mocowanie tłumika do nadwozia i na końcach wózka z dwóch stron. Wymusza to będzie zastosowanie dwóch zamiast jednego tłumika wężykowania. Jednak należy podkreślić, że w technice kolejowej już występują wózki symetryczne czego przykładem jest elektryczny

zespół trakcyjny PESA 654. Jest to wielonapięciowy i rekonfigurowalny elektryczny zespół trakcyjny dwunapięciowy (AC 25 kV 50Hz and DC 3 kV). Pojazd rozpoczął planowy ruch kolejowy w dniu 11 grudnia 2022 roku na liniach z Usti nad Łabą do Děčína i Mostu przez Úpořiny po wydaniu decyzji przez Czeski Urząd Kolejowy o dopuszczeniu do ruchu [112]. Na rysunku 7.7 przedstawiono widok wózków w systemie Jakobsa z tradycyjnym mocowaniem jednym długim tłumikiem wężykowania oraz wózka symetrycznego z dwoma tłumikami mocowanymi centralnie.



Rys. 7.7. Widok wózka Jakobsa z: a) tradycyjnym mocowaniem tłumika wężykowania [fot. A.M. Rilo Cañas], b) nowoczesnym podwójnym mocowaniem centralnie dwóch tłumików wężykowania [113]

7.6. Podsumowanie z analizy wielokryterialnej

Analiza wielokryterialna przeprowadzona metodą unitaryzacji zerowej *MUZ* wykazała, że dla wszystkich rozpatrywanych koncepcji (wariantów) ocenianych na podstawie zmiennych (cech), najlepiej wykorzystać metodę zamiany wózków bez obracania. Na drugim miejscu jest metoda zamiany wózków z obracaniem. W obu przypadkach stwierdzono największe wartości zmiennych agregatowych analizowanych wariantów mimo dużych różnic między metodami. Zarządzanie samymi zestawami kołowymi klasuje metody na 3 i 4 miejscu. Należy podkreślić, że migracja wózków pod względem zwiększenia wymiaru na średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej jest metodą dającą najmniejszy wzrost *D* i *T*. Jednak z punktu pracochłonności rozumianego czasem przeprowadzenia danej koncepcji, zaangażowania pracowników czy kosztów, te metody były najszybsze i najtańsze. Na podstawie algorytmów (rys. 7.4 i 7.5) dla zarządzania zestawami kołowymi w aspekcie zwiększenia wymiaru na średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej, niezależnie od wyników metody unitaryzacji zerowanej możliwe jest wdrożenie każdej koncepcji po decyzji osoby analizującej wybrane lub wszystkie kryteria oceny wszystkich metod (koncepcji).

8. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA KONCEPCJI

8.1. Obiekt badań

Analizując wyniki z zakresu zmiany wymiaru średnicy koła i grubości tarczy hamulcowej podczas ostatniego przeglądu okresowego przed naprawą rewizyjną po wdrożeniu koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w oparciu o charakterystyki zmiany wielkości D i T na poszczególnych $P2$ stwierdzono, że każda z koncepcji pozwala na zwiększenie wymiaru na średnicy koła i grubości tarczy, które odznaczały się największym zużyciem względem klasycznego podejścia zgodnego z obecnym DSU pojazdu. Uzyskany wzrost wymiaru koła lub tarczy o najmniejszym wymiarze przekłada się na dłuższy czas użytkowania pojazdu, a tym samym przebieg pojazdu. Najlepszymi koncepcjami zarówno dla średnicy koła i grubości tarczy, o czym dowodzą przeprowadzone analizy w rozdziale 6 niniejszej rozprawy są w kolejności: zamiana zestawów kołowych w całym pojeździe (ZZWP), zamiana wózków z obracaniem (koncepcja ZWZO), zamiana wózków bez obracania (metoda ZWBO) i zamiana zestawów kołowych (obrót wózka jeśli jest to możliwe) w wózku, koncepcja ZZWW. Ta metoda zarządzania zestawami kołowymi powoduje najmniejszy przyrost wymiaru D i T względem podejścia bez migracji wspomnianych zestawów kołowych. Analizy w tym zakresie również dowiodły, że najlepsza koncepcja w zakresie wzrostu wymiaru najmniejszego na średnicy koła lub tarczy tj. metoda ZZWP z drugiej strony jest najbardziej pracochłonna i kosztowna. Prace nad analizą 4 koncepcji na grupie pojazdów serii EN76 wykazały z jednej strony o przydatność wszystkich metod, z drugiej strony pozwoliły na wybór najlepszej koncepcji dla zarządzania zestawami kołowymi i koncepcji dla wózków. Pojazdy kursowały na różnych trasach jednak w zakresie największego zużycia kół kolejowych dominowało zużycie na skrajnych zestawach napędnych, a w zakresie najmniejszego zużycia, występowało ono na środkowym wózku tocznym. W zakresie tarcz hamulcowych sytuacja na analizowanych pojazdach była odwrotna tj. największe zużycie na wózkach tocznych, a najmniejsze na wózkach skrajnych napędnych. W celu sprawdzenia przydatności analizowanych koncepcji zgodnie z algorytmami zarządzania zestawami kołowymi i wózkami przedstawionymi na rysunku 7.4 i 7.5 konieczna jest ich weryfikacja na innych typach wielocłonowych zespołów trakcyjnych. Badania rozpoznawcze w zakresie zużycia zestawów kołowych na średnicy D i grubości tarcz hamulcowych T jak i późniejsze analizy zastosowania 4 koncepcji i prognozowanie dłuższego czasu użytkowania i przebiegu pojazdu, przeprowadzone zostały na pojeździe wielocłonowym z oparciem nadwozia na wózkach tocznych systemu Jakobsa jak i na klasycznych wózkach napędnych. W badaniach na kolejnym pojeździe sprawdzono możliwość wdrożenia koncepcji z prognozowaniem dłuższego czasu i przebiegu pojazdu, przeprowadzone były na pojeździe z oparciem nadwozi członów na wszystkich wózkach klasycznych.

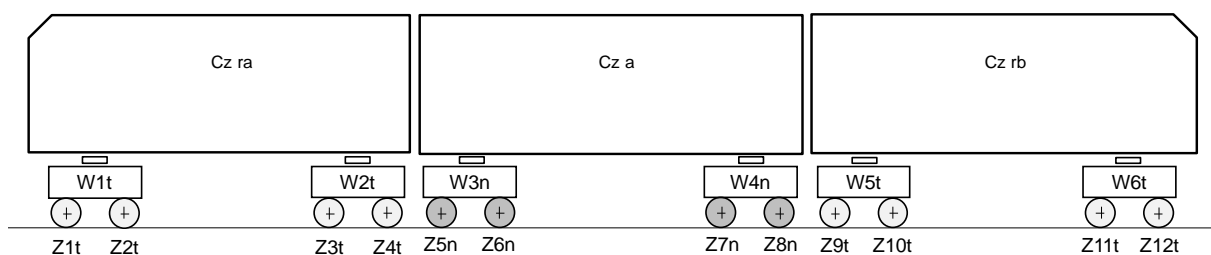
Obiektem badań dodatkowych zastosowania koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami był elektryczny zespół trakcyjny EN57AL (rys. 8.1) wyprodukowany przez nieistniejącą fabrykę PAFAWAG z Wrocławia. Pojazd powstał w wyniku modernizacji popularnych pojazdów serii EN57.



Rys. 8.1. Widok pojazdu EN57AL od strony tyłu składu a) oraz od strony czoła b) [fot. A.M. Rilo Cañas]

Elektryczny zespół trakcyjny po modyfikacjach podobnie jak jego poprzednik przeznaczony jest realizacji połączeń regionalnych o umiarkowanym natężeniu potoków pasażerskich z wysokimi jak i niskimi peronami na stacjach [60].

Pojazdy EN57AL jak większość elektrycznych zespołów trakcyjnych zasilane są napięciem 3kV prądu stałego i przeznaczone są na tor o rozstawie 1435 mm. Wszystkie pojazdy z grupy EN57AL, mogą poruszać się z prędkością 120 km/h, w wersji przed modernizacją prędkość wynosiła 110 km/h. Układ osi analizowanego w badaniach weryfikacyjnych pojazdu to 2'2'+Bo'Bo'+2'2' [16]. Pojazdy serii EN57AL składają się z dwóch skrajnych członów rozrządzących *ra* i *rb* między którymi znajduje się człon silnikowy *s* połączonych sztywnym sprzęgiem ZEk. Na końcach członów rozrządzących zamocowane są sprzęgi samoczynne Scharfenbera, które już występowały w wersjach podstawowych pojazdu tj. w EN57. Sprzęgi samoczynne w latach 60. znacząco wyróżniały pojazdy EN57 względem innych pojazdów kolejowych do przewozu pasażerów. Ich główną zaletą było sprzęganie pojazdów bez pomocy pracownika kolejowego, co poprawiło bezpieczeństwo i skrócenie czasu sprzęgania pojazdów tj. dwie jednostki ze sobą [15, 17]. Układ osi elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57AL przedstawia rysunek 8.2.



Rys. 8.2. Schemat pojazdu EN57AL: Cz ra, Cz rb - Człon rozrządzący toczny z kabiną sterowniczą, Cz a - Człon środkowy napędowy, W1t, W2t, W5t, W6t -Wózki toczne, W3n, W4n-Wózki napędne

Układ osi elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57AL przedstawia rysunek 8.2. Natomiast na rysunku 8.3 przedstawiono widok nowych napędnych obręczowanych zestawów kołowych wraz z ułożyskowaniem na silnikach trakcyjnych członu środkowego napędnego pojazdu EN57AL. Zestawy kołowe zostały wytworzone w zakładzie Lucchini Mińsk Mazowiecki dla modernizowanego pojazdu EN57AL.



Rys. 8.3. Widok napędnych zestawów kołowych pojazdu EN57AL członu środkowego [fot. A.M. Rilo Cañas]

Pojazd EN57AL względem swojego poprzednika tj. EN57 przeszedł szereg modernizacji. Do podstawowych prac należy wymienić, rozruch oporowo-bocznikowy silników trakcyjnych, który został zastąpiony rozruchem impulsowym wraz z dwoma falownikami. Zastosowano asynchroniczne silniki trakcyjne wraz z przekładnią dwustopniową, które pozwoliły na realizację hamowania elektrodynamicznego ED [3]. W zakresie pozostałych prac modernizacyjnych należy wymienić nowoczesne względem poprzednika przekształtniki i przetwornice statyczne napięcia, sprężarki pneumatyczne, wyłącznik szybki oraz drzwi odskokowo-przesuwne. W członach rozrządzących wbudowano kabiny WC przystosowane do korzystania przez osoby niepełnosprawne wyposażona w system toalety próżniowej firmy SEMCO [114]. Jest to tylko część prac modernizacyjnych. Pojazdy EN57AL obecnie eksploatowane są w województwie lubelskim, pomorskim, dolnośląskim, podkarpackim, łódzkim, opolskim, zachodniopomorskim, mazowieckim, wielkopolskim i warmińsko-mazurskim. W sumie są to 154 pojazdy użytkowane przez większość przewoźników w Polsce [115]. Podstawowe parametry techniczne pojazdu EN57AL przedstawiono w tabeli 8.1.

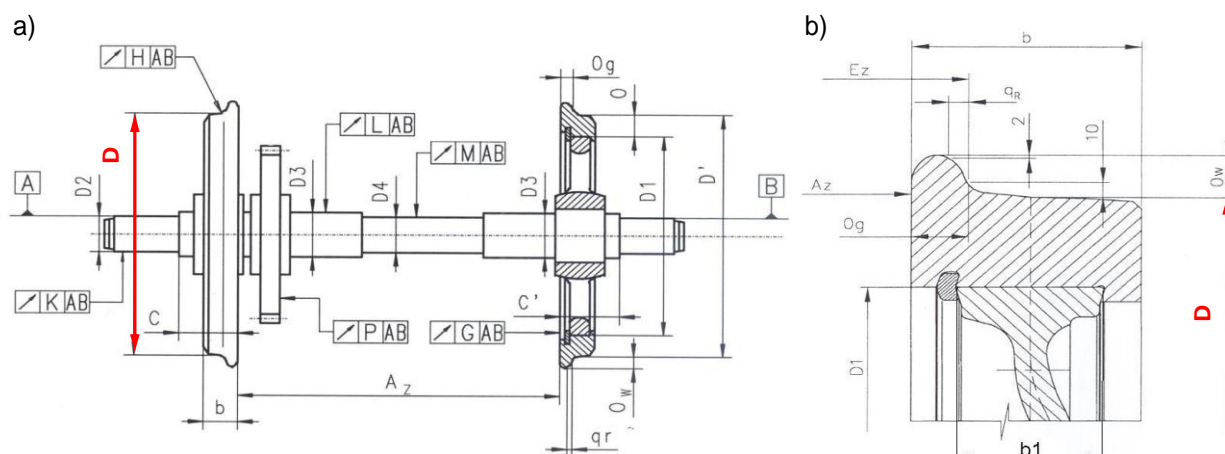
Tab. 8.1. Podstawowe dane techniczne pojazdu EN57AL [15, 16]

Lp.	Nazwa	Wartość	Jednostka
1	Szerokość toru	1435	mm
2	Całkowita długość zespołu ze sprzęgami	64 615	mm
3	Największa szerokość zespołu	2 880	mm
4	Największa wysokość zespołu od główki szyny	3 720	mm
5	Rozstaw czopów skreću dla członu rozrządczego	14 900	mm
6	Rozstaw czopów skreću dla członu silnikowego	15 870	mm
7	Moc zespołu trakcyjnego	4×250	kW
8	Napięcie obwodów głównych	3kV DC	kV
9	Maksymalna prędkość eksploatacyjna	120	km/h
10	Przyspieszenie do 40 km/h	0,8	m/s ²
11	Masa służbowa	132±3%	t
12	Średnica toczna kół napędnych (nowych/zużytych)	1000/940	mm/mm
13	Średnica toczna kół tocznych (nowych/zużytych)	940/890	mm/mm

Porównując dane w tabeli 8.1 dla pojazdu EN57AL względem pojazdu EN57 w oparciu o DSU [14] należy stwierdzić, że po modernizacji maksymalna prędkość eksploatacyjna została zwiększona o 10 km/h i wyniosła 120 km/h. Masa członu rozrządczego zwiększyła się o 5 t (z 33 na 38 t), a członu silnikowego zmniejszona o 1 t. W konsekwencji masa jednostki EN57AL zwiększyła się ze 157,6t na 164,6t. Długość zespołu ze sprzęgami samoczynnymi zwiększyła się o 355 mm z 64970 na 64615 mm. W odniesieniu do łącznej mocy jednostki,

pojazdy serii EN57 posiadały moc 580 kW, w przypadku pojazdu EN57AL moc wyniosła 1000 kW. Zastosowane modernizacje, w tym zabudowa członów rozrządczych kabinami WC oraz przestrzeniami na rowery i większe bagaże sprawiły, że pojazdy EN57AL cechowały się mniejszymi liczbami miejsc siedzących i stojących. W pojazdach EN57 liczba miejsc siedzących wynosiła 212, a miejsc stojących 468. W przypadku pojazdów EN57AL liczba miejsc siedzących wynosi 180, a stojących 249. W ujęciu całkowitym liczba wszystkich miejsc została zmniejszona o 38%. Parametry, które nie zostały zmienione w obu typach pojazdu to m.in. minimalny promień łuku wynoszący 140 m i rozstaw osi wózków tocznych i napędnych wynoszący 2,7 m [17].

Do badań w zakresie oceny zużycia zestawów kołowych i zastosowania metody zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w celu wydłużenia przebiegu i czasu eksploatacji wykorzystano pojazd EN57 o numerze 1027. Analizowany pojazd przeszedł naprawę poziomu *P5* połączona z modernizacją, która miała miejsce w dniu 14.09.2017 r. Od tego dnia rozpoczęto zbieranie danych z kart pomiarowych parametrów geometrycznych zestawów kołowych. Do analizy zużycia zestawów kołowych wykorzystano parametr średnicy D mierzonej w okręgu tocznym obręczowanego zestawu kołowego. Zgodnie z rysunkiem 8.4.



Rys. 8.4. Przekrój: a) napędnego zestawu kołowego z parametrami sprawdzanymi podczas przeglądu P2, b) przekrój fragmentu koła obręczowanego z parametrami profilu obręczy [14]

Ostatni pomiar profilu koła wykonano w dniu 31.12.2021 r. Pojazd zakończył planowy ruch pasażerski i skierowany został na naprawę rewizyjną *P4*. W tabeli 8.2 przedstawiono cykl przeglądowo naprawczy analizowanego pojazdu.

Tab. 8.2. Cykle przeglądów i napraw elektrycznego zespołu trakcyjnego serii EN57AL [16]

Lp.	Poziom utrzymania	Maksymalny przebieg w km	Maksymalny czas
1	P1	2 500 km	-
2	P2	-	najpóźniej po 45 dniach
3	P3	max 250 000 km	najpóźniej po 2,5 roku
4	P4	co 500 000 km	najpóźniej 5 lat + 12 miesięcy
5	P5	max 3 500 000 km	najpóźniej po 30 latach

Badania prowadzono przez okres około 4 lat, w tym okresie pojazd po modernizacji przeszedł 2 naprawy *P3* (przeład duży). Daty przeprowadzonych przeglądów i napraw przedstawiono w tabeli 8.3.

Tab. 8.3. Daty i przebiegi poszczególnych poziomów utrzymania elektrycznego zespołu trakcyjnego serii EN57AL w okresie analizy

Data	Poziom utrzymania	Przebieg w km
27.05.2018 r.	przegląd duży P3	93 635
16.08.2019 r.	przegląd duży P3	289 369
31.12.2021 r.	naprawa rewizyjna P4	487 745

Zgodnie z tabelą 8.3 w dniu 16.08.2019 r. pojazd miał przeprowadzony ostatni przegląd dużym P3 i eksploatowany był do dnia 31.12.2021 r. uzyskując przebieg od początku jazdy tj. od dnia 14.09.2017 r. wynoszący 487745 km do pierwszej naprawy rewizyjnej P4 po modernizacji. Ponadto należy zaznaczyć, że analizowany pojazd EN57AL kursował na terenie nizinnym, z małą liczbą łuków o promieniach poniżej 300 m (z wyjątkiem rozjazdów), co nie intensyfikowało zużycia w okolicy obrzeża kół. Trasy jakie realizował badane pojazdy w ciągu dnia przedstawiono w tabeli 8.4.

Tab. 8.4 Relacje kursowania przez badany pojazd EN57AL

Lp.	Godz. odjazdu	Stacja początkowa i końcowa	Godz. przyjazdu
1	3:45	Zbąszynek – Poznań Główny	5:07
2	5:20	Poznań Główny – Szamotuły	5:50
3	6:06	Szamotuły – Poznań Główny	6:36
4	9:58	Poznań Główny – Środa Wlkp.	10:33
5	10:53	Środa Wlkp. – Poznań Główny	11:28
6	11:43	Poznań Główny – Piła Główna	13:27
7	16:30	Piła Główna – Poznań Główny	18:10
8	18:59	Poznań Główny – Piła Główna	20:45

Ze względu na różną liczbę łuków prawych i lewych na trasach realizowanych przez analizowany pojazd EN57AL, przewoźnik próbował wyrównać zużycia kół prawych i lewych z tytułu podcięcia obrzeży oraz zestawów pierwszych względem ostatnich stosując technikę trójkątowania zespołu trakcyjnego. Technika ta polegała na dwukrotnej zamianie kierunków jazdy po wyjeździe ze stacji Poznań Główny. Pojazd kierowany był na stację Poznań Krzesiny, gdzie zmieniano kierunek jazdy, a następnie kierowany był na stację Poznań Franowo, gdzie ponownie zmieniono kierunek jazdy. W konsekwencji zespół trakcyjny obrócony wracał do stacji Poznań Główny.

W tabeli 8.5 przedstawiono dla badanego pojazdów przebieg i czas eksploatacji od chwili rozpoczęcia regularnych przewozów po modernizacji aż do pierwszej naprawy P4.

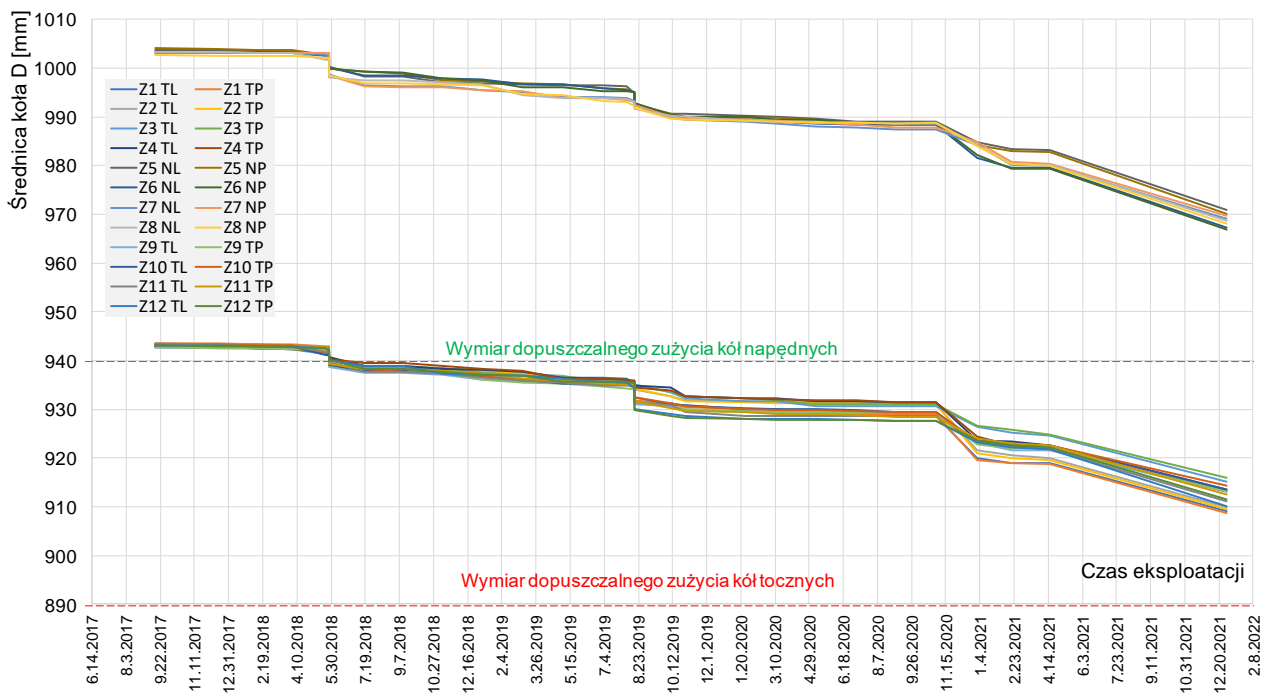
Tab. 8.5. Dane o czasie eksploatacji analizowanego pojazdu EN57AL

Numer pojazdu	Data rozpoczęcia jazdy	Czas eksploatacji	Przebieg
1027	14.09.2017 r.	4 lata 3 miesiące 17 dni	487 745 km

Zestawy kołowe pojazdu EN57AL 1027 nie osiągały kresowego granicznego zużycia i cechowały się dużym zapasem wymiarowym do dalszej eksploatacji, co zostało szczegółowo przedstawione w podrozdziale 8.4.

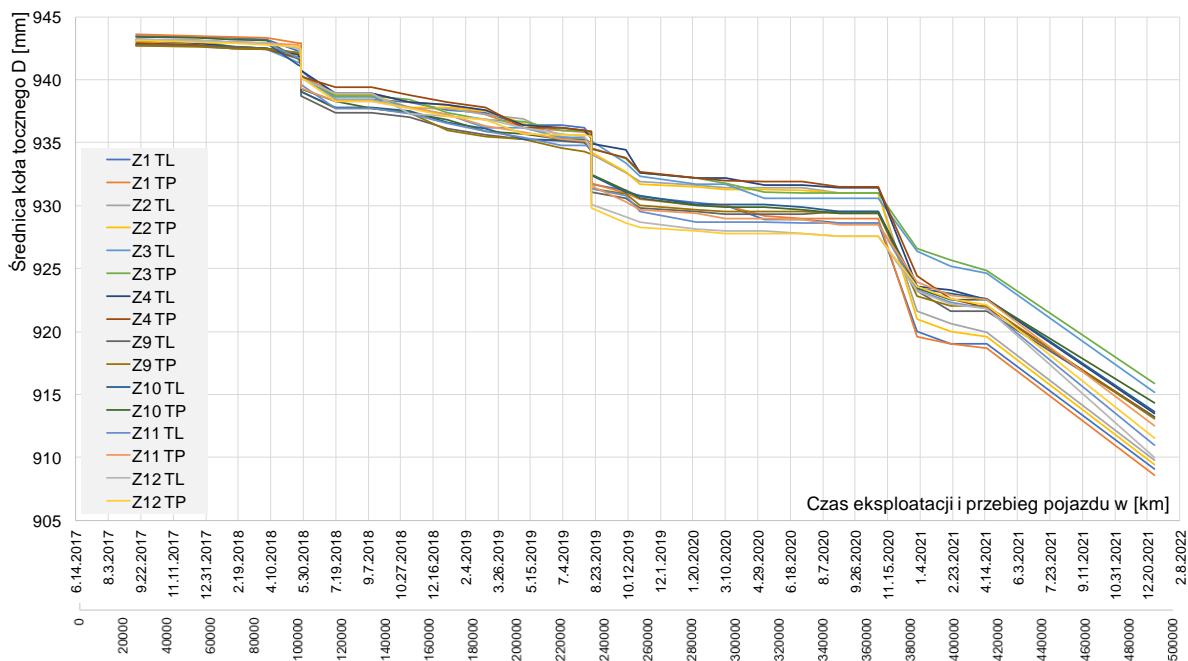
8.2. Wyniki badań średnicy kół

Na rysunku 8.5 przedstawiono graficzną zależność zmiany średnicy kół w elektrycznym zespole trakcyjnym EN57AL od czasu eksploatacji tj. od 14.09.2017 r do 31.12.2021 r. Jest to okres od modernizacji pojazdu do naprawy rewizyjnej P4. Na wykresie linią przerywaną zieloną oraz czerwoną zaznaczono wymiary maksymalnego dopuszczalnego zużycia kół napędnych i tocznych.

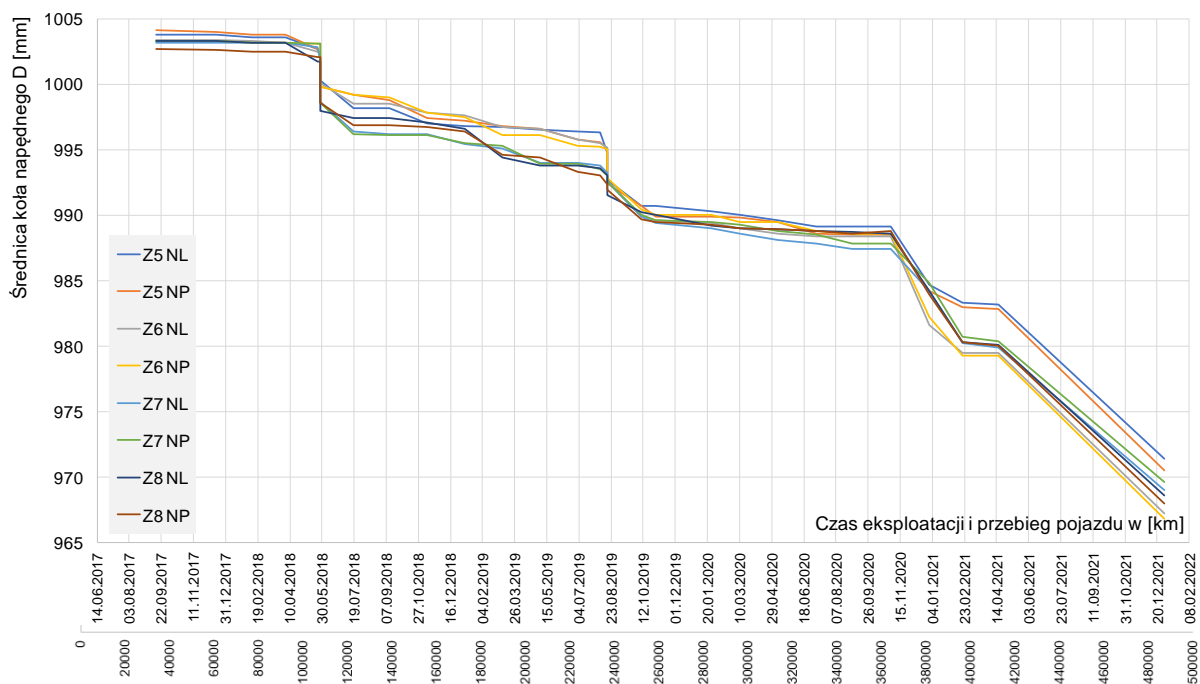


Rys. 8.5. Zależność średnicy kół napędnych i tocznych od czasu eksploatacji, zaobserwowana podczas przeglądów P2 aż do przeglądu P4

Ze względu na różne średnice kół napędnych i tocznych tj. 1000 mm dla nowych kół napędnych i 940 mm dla kół tocznych, obserwacja zmiany średnicy kół podczas poszczególnych przeglądów okresowych P2 jest utrudniona, a zmiany mało widoczne. Na rysunkach 8.6 i 8.7 przedstawiono osobno zależność średnicy D od czasu eksploatacji.



Rys. 8.6. Zależność średnicy kół napędnych od czasu eksploatacji i przebiegu pojazdu EN57AL



Rys. 8.7. Zależność średnicy kół tocznych od czasu eksploatacji i przebiegu pojazdu EN57AL

Tab. 8.6. Wartości zsumowanego zużycia średnicy kół między z okresów co około 6 miesięcy wraz z toceniem profilu koła elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57AL

	Z ₁₋₂	Z ₃₋₄	T ₁	Z ₅₋₇	Z ₈₋₁₀	Z ₁₁₋₁₂	T ₂	Z ₁₃₋₁₅	Z ₁₆₋₁₈	Z ₁₉₋₂₁	Z ₂₂₋₂₃	Z ₂₄
Z1 TL	0,2	1,03	1,51	2,56	1,8	0,94	3,78	1,48	1,3	8,9	1	9,9
Z1 TP	0,2	0,48	2,64	2,08	2	0,62	3,81	1,77	1	9,4	0,9	10,1
Z2 TL	0,2	1	1,14	2,66	0,8	2,68	0,16	2,46	0,2	9,8	1,7	10,1
Z2 TP	0,4	1,07	1,36	2,37	1,3	1,7	0,59	2,71	0,3	10,2	1,4	10,2
Z3 TL	0,3	1,2	1,12	2,38	1,6	1,33	0,73	2,44	1,1	4,2	1,8	9,4
Z3 TP	0,6	0,9	1,45	1,85	1,7	0,9	1,2	2,4	1,2	4,4	1,8	8,9
Z4 TL	0,5	1,37	0,49	2,54	1,8	1,09	0,38	2,73	0,6	8	1,1	9
Z4 TP	0,4	1,35	0,92	1,43	2,6	0,3	1,4	2,3	0,3	7,5	2,5	8,7
Z5 NL	0,2	1,5	1,8	3,3	0,5	1,73	2,09	2,38	1,2	4,4	1,5	11,8
Z5 NP	0,3	1,7	2,29	2,41	0,8	1,48	2,71	2,51	1,3	4,4	1,4	12,3
Z6 NL	0,1	1	2,2	2,3	1,2	1,45	2,58	3,17	1	6,8	2,1	12,3
Z6 NP	0,1	0,1	3,29	2,01	1,7	1,09	2,19	2,82	1,2	6,6	2,9	12,5
Z7 NL	0	1,4	3,17	2,43	2,2	0,77	0,7	3,53	1,2	3,6	4,3	10,9
Z7 NP	0,1	0,1	4,55	2,45	2,2	0,84	0,53	3,03	1	3,7	4,4	10,8
Z8 NL	0,1	1,5	3,72	0,88	3,3	0,79	1,46	2,35	0,4	4,6	4,1	11,5
Z8 NP	0,2	0,4	3,55	1,85	2,3	2,07	0,4	2,63	0,5	4,9	3,9	12
Z9 TL	0,2	0,6	3,31	1,69	1,7	0,92	3,3	1,58	0,2	6,1	1,6	8,4
Z9 TP	0,2	0,6	2,84	1,66	2,1	1,2	2,75	1,65	0,2	6,7	0,8	8,9
Z10 TL	0,2	1,9	2,03	1,57	2,2	0,3	2,59	2,31	0,2	6,5	0,8	9
Z10 TP	0,2	1,6	2,36	1,84	1,7	0,7	2,53	2,47	0,3	6,3	0,9	8,2
Z11 TL	0,2	1,3	2,11	2,29	1,9	0,7	3,34	2,66	0,1	5,3	1,5	10,8
Z11 TP	0,2	1	2,66	1,54	2	0,8	3,45	2,15	0,5	5	1,4	10
Z12 TL	0,2	1,19	1,7	2,81	1,1	1,82	4,32	1,96	0,3	4,6	1,4	11,8
Z12 TP	0,2	0,51	2,22	2,47	2	0,2	5,7	1,8	0,2	4,2	1,5	10,6

Z1 TL – lewe koło toczne zestawu kołowego nr 1,

Z1 TP – prawe koło toczne zestawu kołowego nr 1,

Z₁₋₂ – suma zużycia średnicy koła zmierzona od pierwszego przeglądu P2 do drugiego przeglądu P2 w [mm].

Z5 NL – lewe koło napędne zestawu kołowego nr 5,

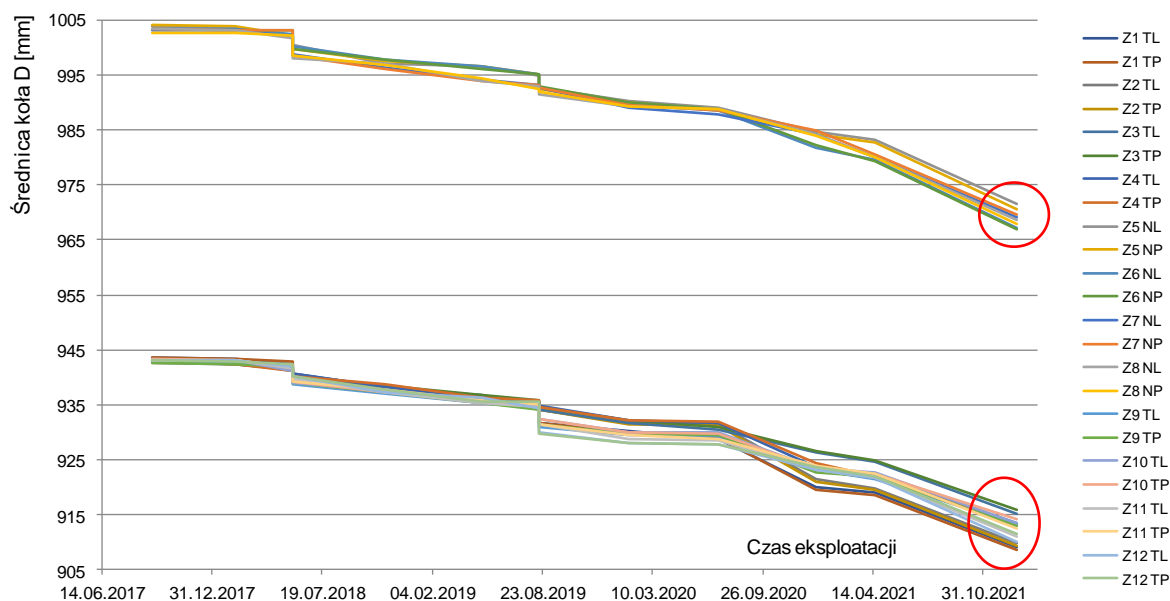
Z5 NP – prawe koło napędne zestawu kołowego nr 5,

T₁ – wartość grubości warstwy skrawnej podczas pierwszego toczenia koła w [mm].

Na podstawie rysunków 8.6 i 8.7 stwierdza się, że w dniach 27.05.2018 r. i 17.08.2019 r. odbyły się przetoczenia kół na nowy wymiar średnicy ze względu na wady powierzchni tocznej i niezachowanie profilu koła zgodnie z szablonem UIC. Na podstawie otrzymanej dokumentacji od przewoźnika wynika, że odbyły się tylko dwa przetoczenia w roku 2018 i 2019, należy podejrzewać, że w kolejnych latach tj. 2020 i 2021 również odbyły się przetoczenia jako reprofilacje z bardzo małą głębokością skrawania, co nie zostało odnotowane w kartach pomiarów geometrycznych zestawów kołowych. W tabeli 8.6 przedstawiono w milimetrach wyniki zsumowanego zużycia kół z podziałem na okresy co około 6 miesięcy (co najmniej 3 przeglądy *P2*) pojazdu z uwzględnieniem wartości grubości warstwy skrawanej podczas toczenia profilu kół (tzw. reprofilacja kół). W okresie 4 lat w odniesieniu do pomiarów średnicy koła wykonano 24 przeglądy *P2* oraz 2 przetoczenia profilu koła.

8.3. Wyniki wartości średnicy kół po zarządzaniu zestawami kołowymi

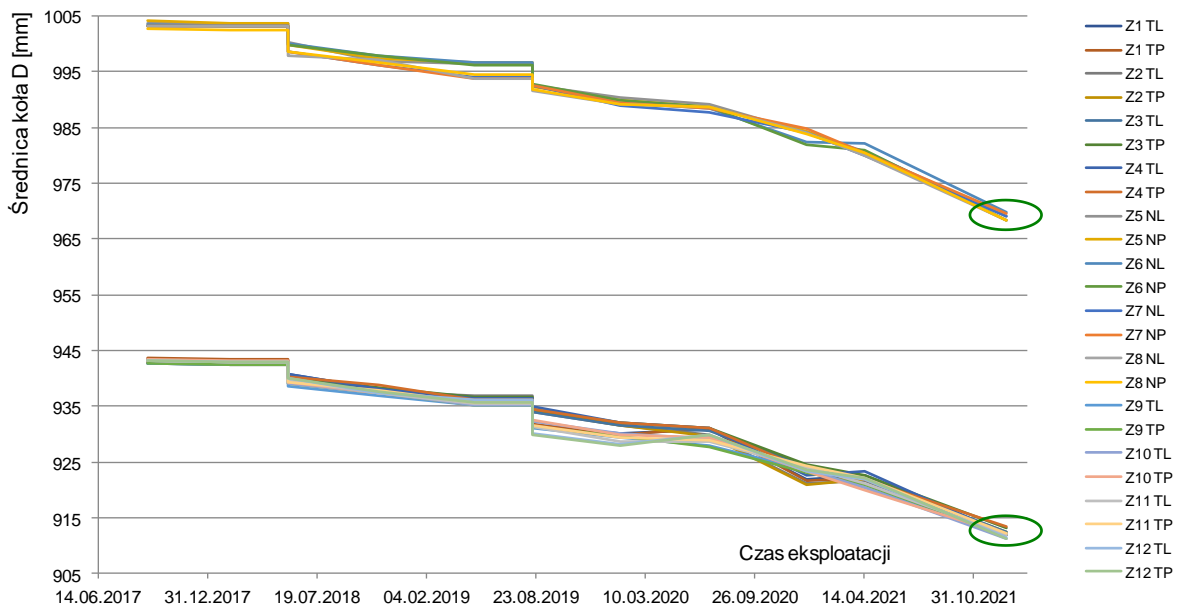
Dla zaproponowanych koncepcji na podstawie wyników zużycia na średnicy kół oraz wartości przetoczeń kół jaki uzyskał jeden z analizowanych pojazdów EN57AL eksploatowany w okresie 5 lat - dokonano modelowego wyznaczenie charakterystyk przebiegu średnicy kół w funkcji czasu. Na przykładowym rysunku 8.8 przedstawiono charakterystykę analizowanego pojazdu EN57AL, z którego zebrano dane o zużyciu kół oraz wartości przetoczeń kół, które zapisano wcześniej w tabeli 8.6. Na rysunku 8.8 nie zaznaczono wartości z poszczególnych średnic zarejestrowanych podczas przeglądów *P2*, tylko wartości z tych okresów, w których będzie przeprowadzona migracja zestawów kołowych lub wózków w procesie zarządzania.



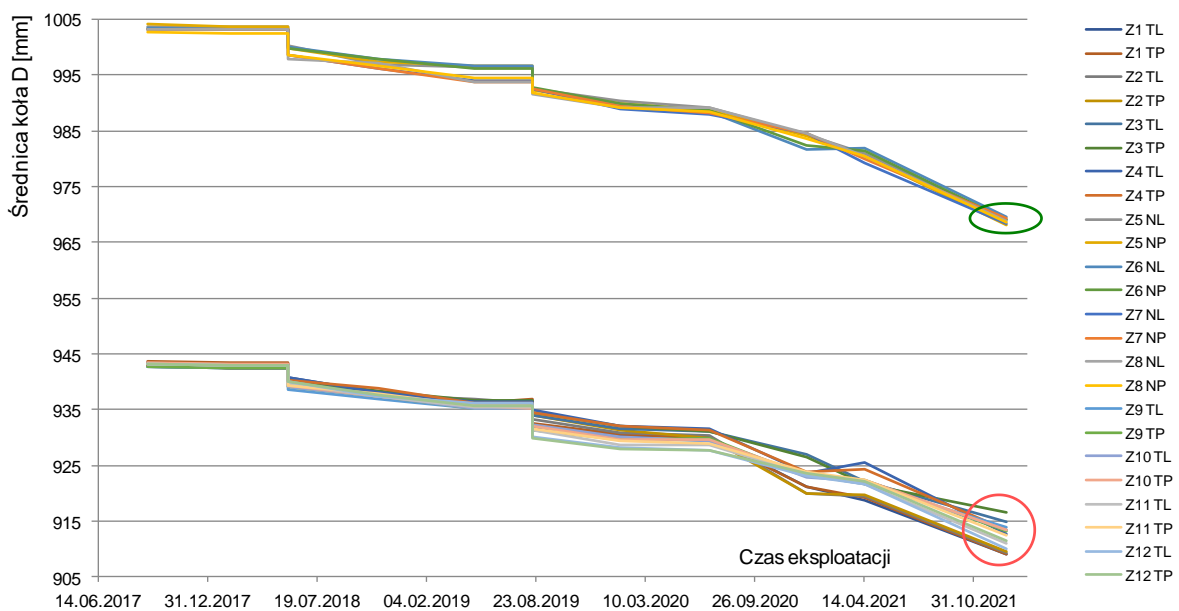
Rys. 8.8. Zależność średnicy kół od czasu dla klasycznego podejścia do utrzymania zestawów kołowych zgodnie z DSU w oparciu o zsumowane wartości zużycia kół i przetoczeń kół

Analizując rysunek 8.8 z wykresem zmiany średnicy kół pojazdu EN57AL eksploatowanego w okresie od 14.09.2017 r. do 31.12.2021 r. stwierdza się, zauważalny duży rozrzut wartości średnicy kół podczas przeglądów *P2* w ostatnim czwartym roku eksploatacji pojazdu przed naprawą rewizyjną *P4*. Okręgami w kolorze czerwonym zaznaczono rozrzut wartości średnicy kół zarówno w wózkach tocznych jak i napędnych.

Na rysunkach 8.9-8.12 przedstawiono modele charakterystyk średnicy kół w funkcji czasu po zastosowaniu czterech koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami.

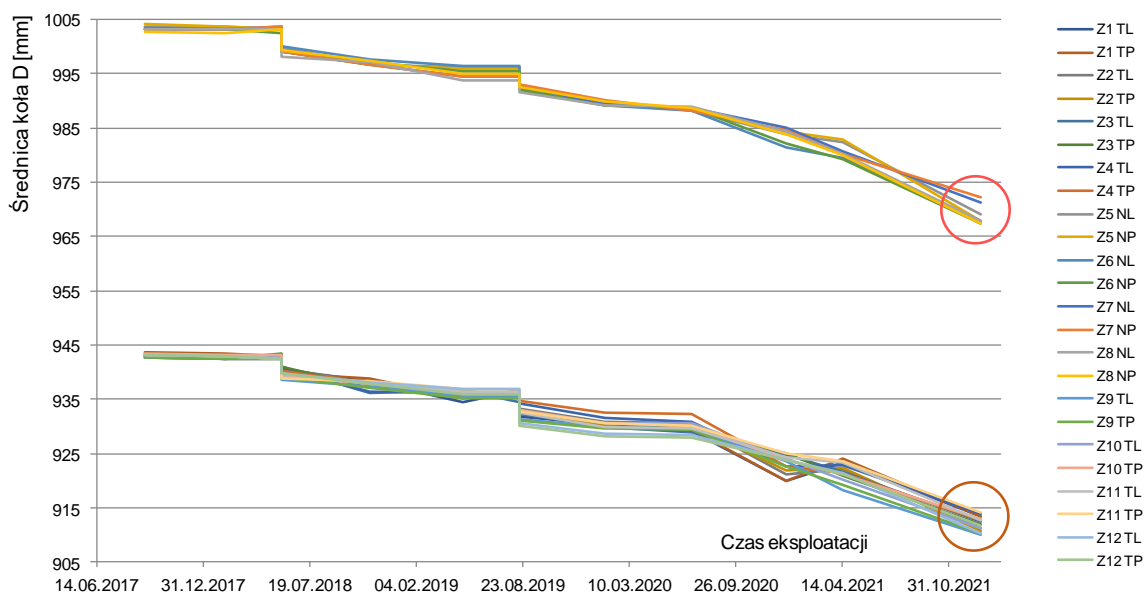


Rys. 8.9. Zależność średnicy kół od czasu dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w całym pojeździe (konceptcja ZZWP)

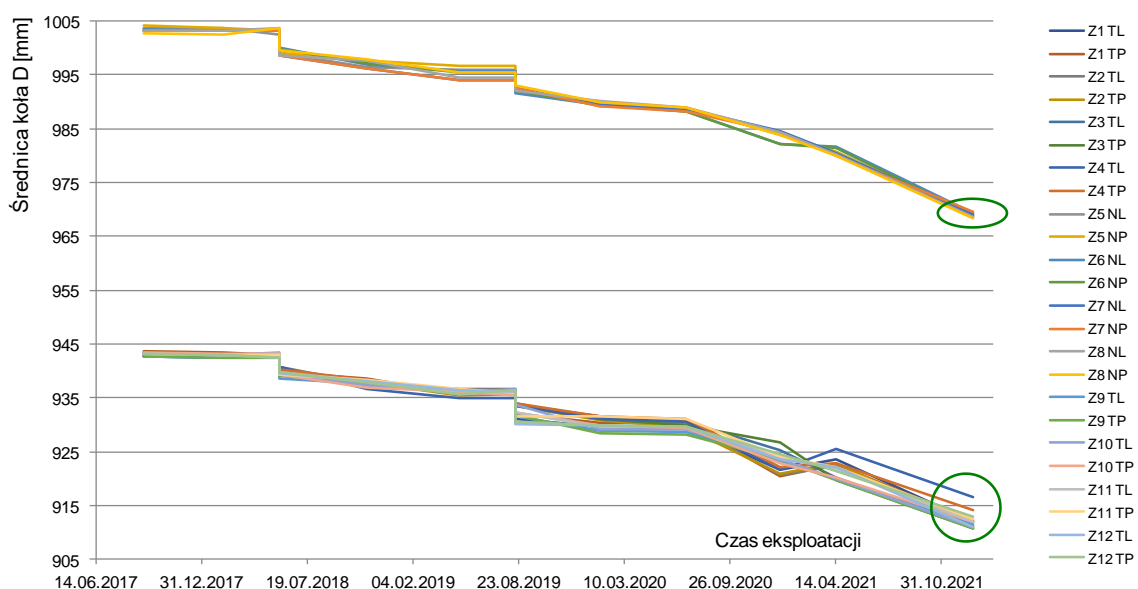


Rys. 8.10. Zależność średnicy kół od czasu dla koncepcji zamiany zestawów kołowych w wózku (konceptcja ZZWW)

Na rysunku 8.9 przedstawiono model zmiany średnicy kół w przypadku zastosowania koncepcji zamiany (migracji) zestawów kołowych w całym pojeździe. Na rysunku 8.10 przedstawiono zależność średnicy kół po zastosowaniu koncepcji z zamianą zestawów kołowych w wózku (konceptcja obrotu wózka o 180°). Na rysunku 8.11 przedstawiono wartości średnic jakie otrzymałby pojazd po zastosowaniu koncepcji zamiany wózków bez obracania, a na rysunku 8.12 – po zastosowaniu zamiany wózków z możliwością ewentualnego obrotu.



Rys. 8.11. Zależność średnicy kół od czasu dla koncepcji zamiany wózków bez obracania (konceptcja ZWBO)



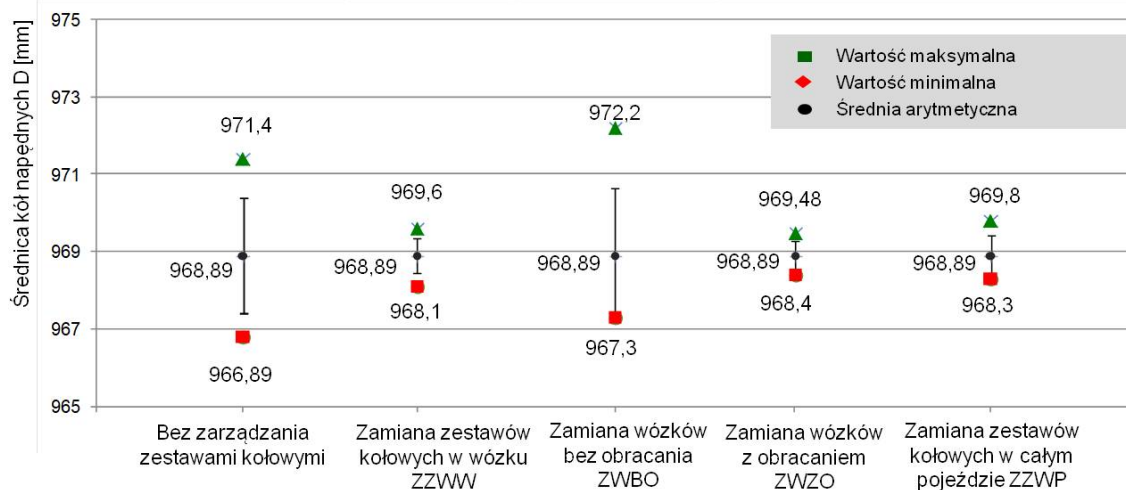
Rys. 8.12. Zależność średnicy kół od czasu dla koncepcji zamiany wózków z obracaniem (konceptcja ZWZO)

Niezależnie od zastosowanej koncepcji, w odniesieniu do klasycznego podejścia utrzymania zestawów kołowych w elektrycznym zespole trakcyjnym stwierdza się, że w każdym przypadku uzyskano wzrost wartości wymiaru koła o najmniejszej średnicy względem pozostałych kół, co zaobserwowano zarówno dla kół tocznych jak i napędnych. Ponadto rozrzut wartości średnic rozumiany odchyleniem standardowym przy ostatnim przeglądzie okresowym jest mniejszy względem metody bez zarządzania zestawami lub wózkami (z wyjątkiem zestawów tocznych dla koncepcji z obrotem wózka). Na wykresach okręgami w różnych kolorach zaznaczono rozrzut wartości średnic kół tocznych i napędnych uzyskanych podczas ostatniego przeglądu okresowego poprzedzającego naprawę rewizyjną.

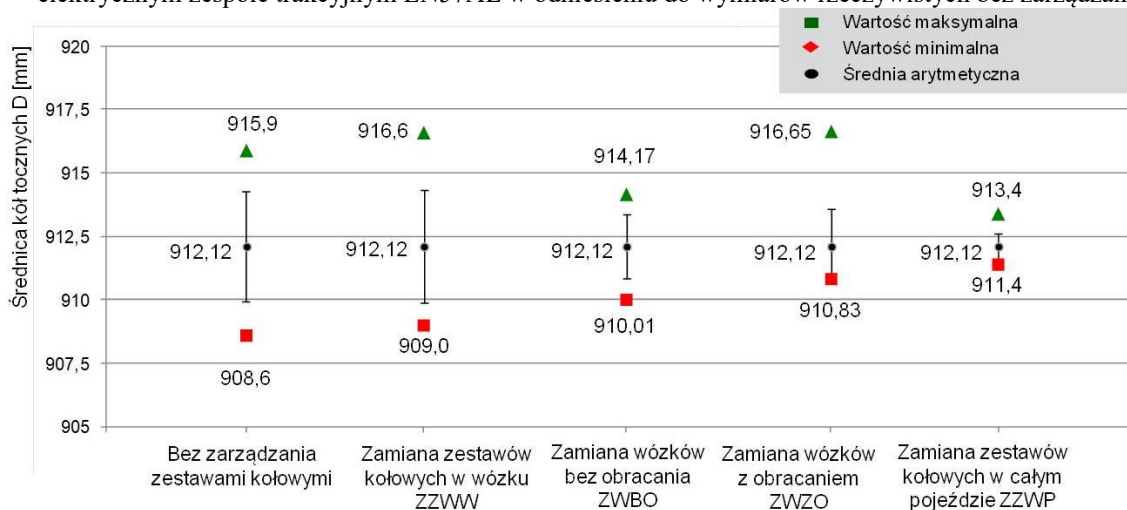
Na rysunkach 8.13 i 8.14 oraz w tabeli 8.7 przedstawiono wartości skrajne tj. maksymalnej i minimalnej średnicy kół jakie uzyskałby elektryczny zespół trakcyjny EN57AL podczas ostatniego przeglądu okresowego po zastosowaniu 4 zaproponowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami bez i z obracaniem. Dodatkowo przedstawiono wartości średniej arytmetycznej i odchylenie standardowe dla każdej z koncepcji z podziałem na zestawy napędne i toczne.

Tab. 8.7. Wartości średnic kół w mm uzyskanych na ostatnim przeglądzie P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN57AL

	Bez zarządzania ZK*	Zamiana ZK w wózku ZZWW	Zamiana wózków bez obracania ZWBO	Zamiana wózków z obracaniem ZWZO	Zamiana ZK w całym pojeździe ZZWP
dla napędnych zestawów kołowych					
Wartość MAX	971,4	969,6	972,2	969,48	969,8
Wartość MIN	966,8	968,1	967,3	968,4	968,3
Średnia ¹	968,89	968,89	968,89	968,89	968,89
Odchylenie standardowe ¹	1,48	0,46	1,75	0,37	0,53
dla tocznych zestawów kołowych					
Wartość MAX	915,9	916,6	914,17	916,65	913,4
Wartość MIN	908,6	909,0	910,01	910,83	911,4
Średnia ²	912,12	912,12	912,12	912,12	912,12
Odchylenie standardowe ²	2,18	2,22	1,27	1,45	0,52
ZK – zestaw kołowy			² – dla tocznych zestawów kołowych.		
¹ – dla napędnych zestawów kołowych,					



Rys. 8.13. Wartości średnic kół napędnych z wartością średnią i odchyleniem standardowym na ostatnim przeglądzie P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN57AL w odniesieniu do wymiarów rzeczywistych bez zarządzania



Rys. 8.14. Wartości średnic kół tocznych z wartością średnią i odchyleniem standardowym na ostatnim przeglądzie P2 po zastosowaniu analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi i wózkami w elektrycznym zespole trakcyjnym EN57AL w odniesieniu do wymiarów rzeczywistych bez zarządzania

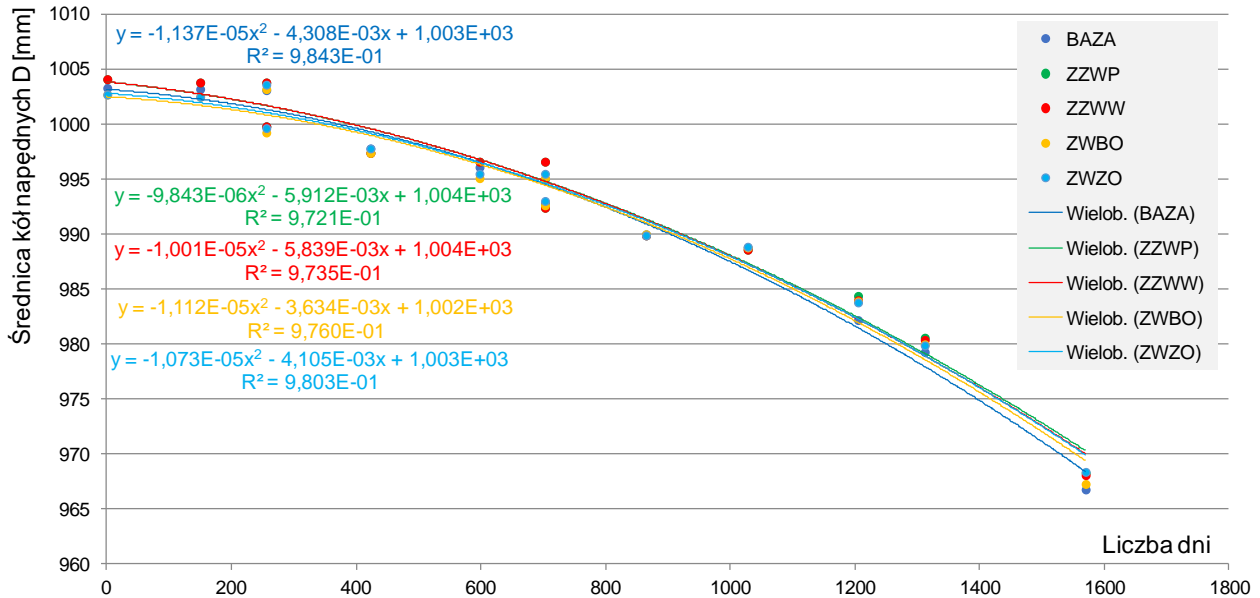
Analizując rysunek 8.13 i 8.14 stwierdzono, że w zakresie koła tocznego i napędnego o najmniejszej średnicy zmierzonej na ostatnim przeglądzie okresowym *P2*, po zastosowaniu koncepcji zamiany zestawów w całym pojeździe, możliwe jest uzyskanie średnicy większej o około 3 mm dla zestawów napędnych i 1,5 mm dla zestawów tocznych względem klasycznego podejścia wynikającego z dokumentacji systemu utrzymania bez stosowania zarządzania zestawami kołowymi. Podobne wzrost średnicy kół o najmniejszej średnicy, można uzyskać stosując metodę zamiany wózków z możliwością ich dodatkowego obrotu. Najmniejszymi przyrostami wartości średnicy kół odznacza się koncepcja obrotu wózka (zamiany zestawów kołowych w ramach jednego wózka) oraz koncepcja migracji wózków bez obracania. Wynika to z ograniczeń tych koncepcji, w szczególności dla obrotu wózka. Rozrzut wartości średnic (odchylenie standardowe) dla koncepcji z migracją zestawów kołowych w wózkach napędnych i tocznych wyniósł odpowiedni 0,53 mm i 0,52 mm. W przypadku klasycznego podejścia bez zarządzania zestawami kołowymi w analizowanym elektrycznym zespole trakcyjnym EN57AL, odchylenia standardowe wyniosły odpowiednio 1,48 mm i 2,18 mm dla kół wózków napędnych i tocznych. Zgodnie z DSU pojazdu zakres zużycia między średnicami max i min wynosi 60 mm dla wózków napędnych i 50 mm dla wózków tocznych. W tabeli 8.8 przedstawiono w ujęciu procentowym oraz w milimetrach zmianę wymiaru na średnicy koła po zastosowaniu 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi.

Tab. 8.8. Zmiana wymiaru na średnicy koła o największym zużyciu dla analizowanych koncepcji

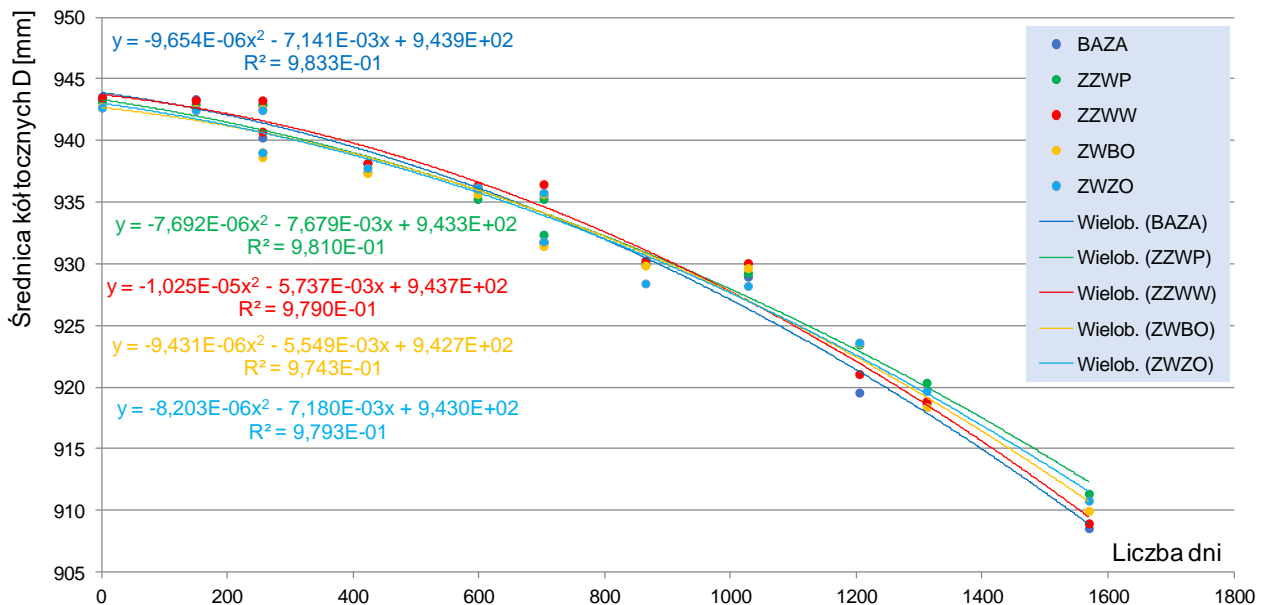
	Zamiana ZK w wózku	Zamiana wózków bez obracania	Zamiana wózków z obracaniem	Zamiana ZK w całym pojeździe
dla napędnych zestawów kołowych				
Zmiana wymiaru w [mm]	1,3	0,5	1,6	1,5
Zmiana wymiaru w [%]	2,2	0,8	2,7	2,5
dla tocznych zestawów kołowych				
Zmiana wymiaru w [mm]	0,4	1,4	2,2	2,8
Zmiana wymiaru w [%]	0,8	2,8	4,5	5,6

W ujęciu jakościowym (procentowym) zmiana wymiaru na średnicy koła o najmniejszej średnicy wyniosła odpowiednio 2,5% dla kół wózków napędnych i 5,6% dla kół wózków tocznych w najlepszej koncepcji związanej z migracją zestawów w całym pojeździe. Małe wartości procentowe przyrostu wymiaru wynikają z małego rozrzutu wartości średnic kół (odchylenia standardowego) w analizowanym pojeździe EN57AL w całym procesie jego eksploatacji. W przypadku pojazdu EN57 opisywanego i ocenianego w rozdziale 6 pracy wartości odchylenia standardowego wyniosły 12 i 7 mm dla zestawów napędnych i tocznych. Pojazd EN57AL cechował się odchyleniami standardowymi rozrzutu wartości średnic kół od wartości średniej odpowiednio tylko 1,5 i 2,2 mm.

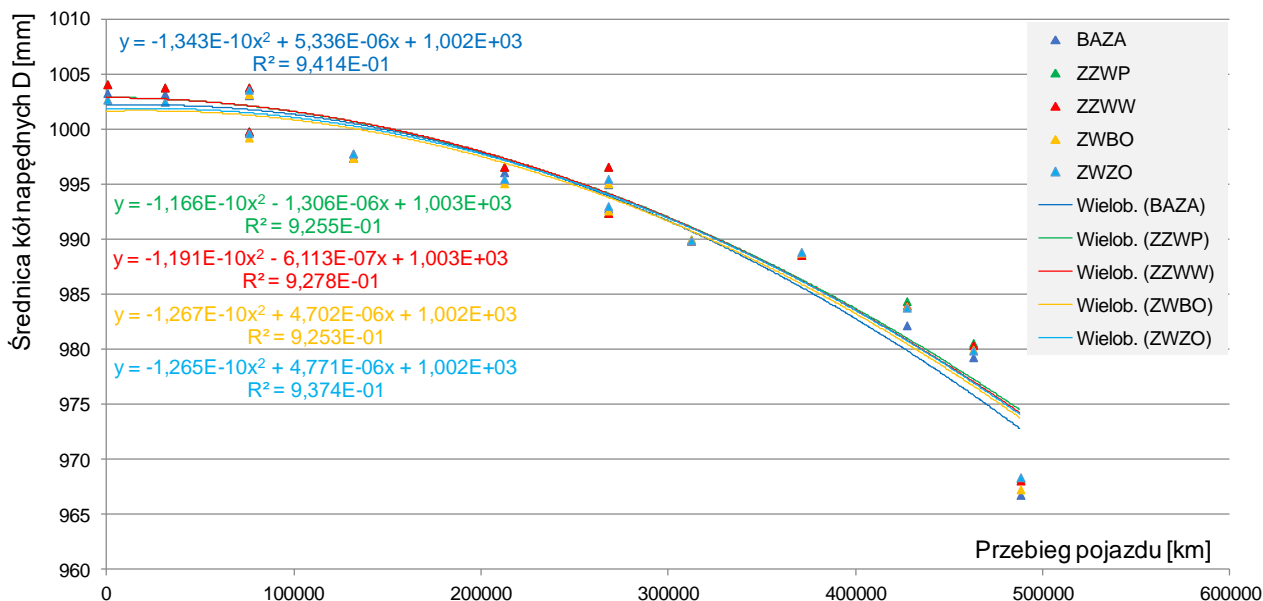
Na podstawie wartości zmiany średnicy kół *D* dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami dla wymiaru minimalnego dokonano aproksymacji przebiegów *D* z oszacowaniem przyrostu dni użytkowania i przebiegu zestawu kołowego. Charakterystyki w postaci kwadratowych funkcji aproksymujących odniesiono do wymiaru rzeczywistego z przebiegu najniższej wartości *D* bez zastosowania migracji zestawów kołowych lub wózków.



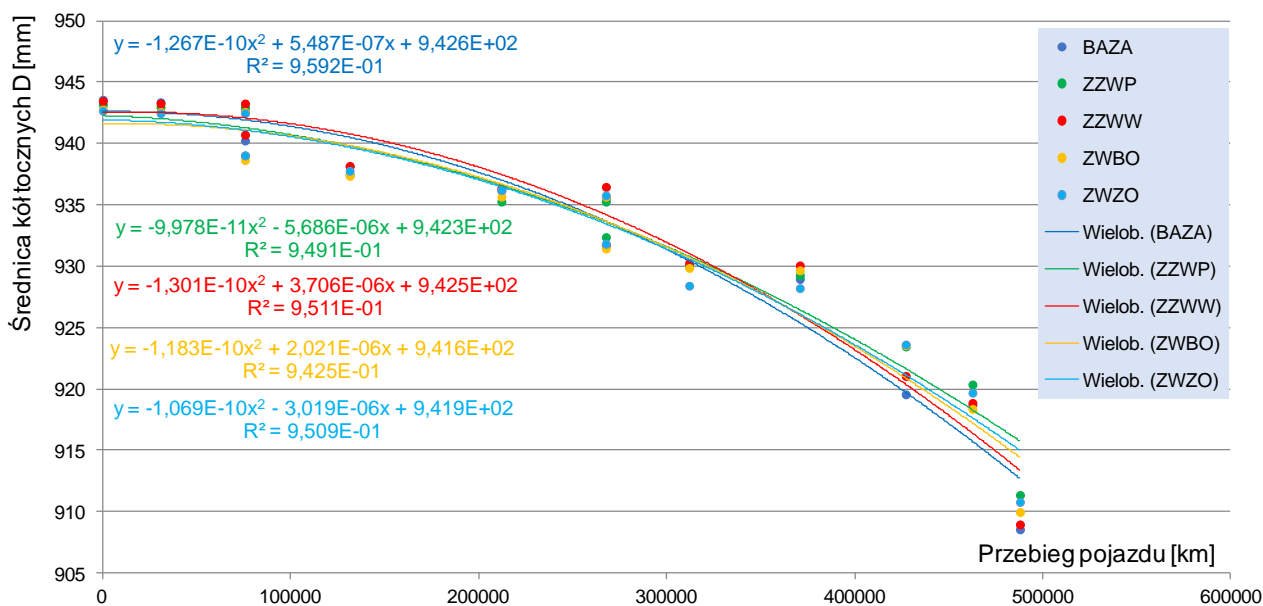
Rys. 8.15. Zależność średnicy kół o najniższym wymiarze w okręgu tocznym D wózków napędnych dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji czasu eksploatacji pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi



Rys. 8.16. Zależność średnicy kół o najniższym wymiarze w okręgu tocznym D wózków tocznych dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji czasu eksploatacji pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi



Rys. 8.17. Zależność średnicy kół o najniższym wymiarze w okręgu tocznym D wózków napędnych dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi



Rys. 8.18. Zależność średnicy kół o najniższym wymiarze w okręgu tocznym D wózków tocznych dla analizowanych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w funkcji przebiegu pojazdu z regresyjnymi modelami kwadratowymi

Na rysunkach 8.15-8.18 przedstawiono charakterystyki zmiany średnicy kół z wymiarem najniższym (wartość minimalna) w funkcji czasu i przebiegu z regresyjnymi modelami kwadratowymi dla wszystkich analizowanych koncepcji z podziałem na zestawy z wózków napędnych i tocznych.

Na podstawie regresyjnych modeli kwadratowych wymiaru D przedstawionych na rysunkach 8.15-8.18 dokonano próby oszacowania wydłużenia czasu użytkowania i zwiększenie przebiegu pojazdu w odniesieniu do modelu bazowego nie uwzględniającego zastosowania koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. W tabelach 8.9 i 8.10

przedstawiono wydłużenia czasu przeliczonego na dni użytkowania i zwiększenia przebiegu zestawu kołowego w kilometrach o najniższym wymiarze D .

Tab. 8.9. Wydłużenie czasu i zwiększenie przebiegu pojazdu dla analizowanych koncepcji zwiększenia wymiaru minimalnego średnicy koła D z wózków napędnych w odniesieniu do podejścia bez migracji zestawów kołowych lub wózków

Koncepcja	Wymiar minimalny D [mm]	Wydłużenie czasu w dniach	Zwiększenie przebiegu w [km]	Zestaw kołowy
BAZA	966,8	0	0	Z6 NP
ZZWW	968,1	53	16545	Z5 NP
ZWBO	967,3	18	13762	Z8 NP
ZWZO	968,4	50	14491	Z8 NP
ZZWP	968,3	62	19412	Z5 NP

Tab. 8.10. Wydłużenie czasu i zwiększenie przebiegu pojazdu dla analizowanych koncepcji zwiększenia wymiaru minimalnego średnicy koła D z wózków tocznych w odniesieniu do podejścia bez migracji zestawów kołowych lub wózków

Koncepcja	Wymiar minimalny D [mm]	Wydłużenie czasu w dniach	Zwiększenie przebiegu w [km]	Zestaw kołowy
BAZA	908,6	0	0	Z1 TP
ZZWW	909,0	13	4706	Z1 TL
ZWBO	910,01	51	17268	Z9 TL
ZWZO	910,83	77	23990	Z9 TP
ZZWP	911,4	104	33167	Z10 TL

Analizując dane zawarte w tabelach 8.9 i 8.10 stwierdza się, że największe wydłużenie czasu eksploatacji zestawu kołowego w zakresie średnicy D oraz zwiększenie przebiegu uzyskuje się stosując metodę migracji zestawów kołowych w całym pojeździe (metoda ZZWP). Następną metodą w tym zakresie (wydłużenie czasu i przebiegu) uzyskano przez zamianę wózków z ich obrotem (metoda ZWZO), a w przypadku wózków napędnych również metodę obrotu wózka (metoda ZZWW). W przypadku zestawów wózków tocznych możliwe jest wydłużenie przebiegu o ponad 30 tys. km, a w przypadku zestawów wózków napędnych o 20 tys. km stosując migrację zestawów kołowych w całym pojeździe względem klasycznego podejścia do eksploatacji zestawów kołowych. W przeliczeniu na dłuższy czas eksploatacji jest to ponad dwa miesiące dla zestawów wózków napędnych i ponad trzy miesiące dla zestawów wózków tocznych.

8.4. Podsumowanie badań

Badania przeprowadzone na kolejnym wybranym elektrycznym zespole trakcyjnym EN57AL dowiodły o zasadności wdrożenia 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami jak w przypadku pojazdów serii EN76. Zarządzanie w rozumieniu migracji pod pojazdem zarówno zestawów kołowych jak i wózków pozwoliły na zwiększenie wartości wymiaru minimalnego, który uzyskiwał jeden z zestawów kołowych przed przeglądem $P4$ tj. naprawą rewizyjną.

Z przeprowadzonych analiz w badaniach dodatkowych nad 4 koncepcjami zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami stwierdzono, że:

- 1) Największy przyrost czasu użytkowania pojazdu jak i jego przebiegu uzyskano tak samo jak w przypadku analiz na pojeździe EN76, stosując koncepcje uszeregowane w następującej kolejności: migracji zestawów kołowych w całym pojeździe (koncepcja ZZWP), zamiany wózków z obracaniem (koncepcja ZWZO), zamiany wózków bez obracania (koncepcja ZWBO) oraz koncepcja zamiany zestawów kołowych w wózku

- (ZZWO), która również przy możliwościach konstrukcyjnych wózka tożsama jest z obrotem wózka.
- 2) Podwyższenie wymiaru minimalnego dla średnicy kół niezależnie od wdrożonej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi jest uzależnione od liczby okresów przeznaczonych na zamianę zestawów kołowych lub wózków. Im większa liczba okresów zamiany tym większy wzrost wymiaru minimalnego dla średnicy koła D zarówno w wózkach tocznych jak i napędnych.
 - 3) Proces zarządzania zestawami kołowymi przynosi większy efekt jeżeli na poszczególnych przeglądach okresowych znacząco zwiększa się różnica między wymiarem maksymalnym i minimalnym koła ze wszystkich zestawów kołowych, co również przekłada się na duże wartości odchylenia standardowego od wartości średniej średnicy kół ze wszystkich zestawów kołowych. W przypadku analizowanego pojazdu EN57AL na zestawach tocznych uzyskano większe przebiegi pojazdu jak i dni użytkowania stosując regresyjne modele kwadratowe średnicy kół niż w przypadku zestawów napędnych.
 - 4) Dla zestawów tocznych możliwe jest wydłużenie przebiegu o ponad 33 tys. km (104 dni) gdyż różnica między wymiarem max, a min średnicy kół w klasycznym podejściu do eksploatacji zestawów kołowych wyniosła 7,3 mm (odchylenia standardowe 2,2 mm). W przypadku zestawów tocznych uzyskano zwiększony przebieg pojazdu do 20 tys. km (62 dni) gdyż różnica między wymiarem max, a min średnicy kół wyniosła tylko 4,6 mm przy odchyleniu standardowym $S=1,5$ mm. Analizowany wcześniej pojazd EN76 w badaniach rozpoznawczych cechował się odchyleniem standardowym wynoszącym 12 dla zestawów napędnych i 7 mm dla zestawów tocznych. Tak znaczące wartości odchylenia standardowego bezpośrednio przekładają się bardzo duże różnice między wymiarami maksymalnym, a minimalnym ze wszystkich średnic kół i dla takich przypadków obserwuje się największe przyrosty zwiększenia wymiaru minimalnego jednego z zestawów kołowych na ostatnim planowanym przeglądzie okresowym $P2$.

9. PODSUMOWANIE PRACY

9.1. Wnioski naukowe

Niniejsza praca dotyczyła problematyki zużycia zestawów kołowych w zakresie kół i tarcz hamulcowych wielocłonowych elektrycznych zespołów trakcyjnych. W pracy dokonano analizy zjawisk tarcia, zużycia zestawów kołowych jak i procesów obsługowo-naprawczych w pojazdach szynowych obecnie stosowanych na podstawie przeglądu literaturowego. Przeprowadzono pierwsze badania rozpoznawcze w zakresie zużycia kół kolejowych opisanych szeregiem parametrów profilu koła jak również drugie badania rozpoznawcze w elektrycznych zespołach trakcyjnych potwierdzających zmienny charakter zużycia poszczególnych zestawów kołowych pojazdu. Na podstawie wniosków z tych badań zaprezentowano i przeanalizowano takie rozwiązania techniczne możliwe do zastosowania w eksploatacji pojazdów szynowych pozwalające na wydłużenie czasu użytkowania jak i zwiększenie przebiegu realizując cztery różne koncepcje zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Wspomniane koncepcje związane są z zamianą (migracją) zestawów kołowych lub wózków z miejsc o największym zużyciu na podwoziu pojazdu w inne miejsca o najmniejszym zużyciu dla wyrównania zużycia na wszystkich zestawach kołowych wielocłonowego zespołu trakcyjnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksploatacyjnych opracowano algorytmy, umożliwiające realizację poszczególnych koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami w oparciu o szereg kryteriów jak przyrost wymiaru średnicy koła lub grubości tarczy, czas realizacji koncepcji, wyposażenie techniczne, liczbę zaangażowanych pracowników czy koszt realizacji koncepcji. Opracowane algorytmy umożliwiają realizację każdej koncepcji w zależności o kryterium decyzyjnego, co zostało potwierdzone jedną z metod programowania wielokryterialnego.

Zaproponowane koncepcje zostały potwierdzone na innym elektrycznym zespole trakcyjnym o odmiennym układzie rozmieszczenia wózków kolejowych, typie wózków wraz z zestawami kołowymi oraz sposobie posadowienia poszczególnych członów na wózkach względem pojazdu z badań rozpoznawczych.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz uzyskanych wyników stwierdzono, że tezę pracy brzmiącą: możliwe jest wydłużenie czasu użytkowania i wydłużenie przebiegu pojazdu szynowego poprzez odpowiednie zarządzanie zestawami kołowymi w systemie ich eksploatacji oparte o wybrane charakterystyki ich zużycia – należy przyjąć. Ponadto w trakcie realizacji niniejszej pracy sformułowano następujące wnioski naukowe:

1. W przypadku stałych i niezmiennych warunków brzegowych związanych z eksploatacją zestawów kołowych, obserwuje się liniowe zużycie powierzchni tocznej kół. Na tej podstawie możliwe jest prognozowanie dalszego zużycia.
2. W sytuacji użytkowania pojazdów szynowych w różnych warunkach (ukształtowanie terenu, liczba łuków, prędkość, obciążenie itp.) procesy zużycia nie dają się opisać jedną matematyczną zależnością, które byłaby przydatne przy ocenie stanu kół kolejowych.
3. W przypadku powierzchni tocznej kół można zaobserwować zarówno okresy o zużyciu liniowym jak i okresy o zużyciu nieliniowym, co ma miejsce przy zmiennych warunkach użytkowania pojazdów szynowych.
4. Analizując wiedzę z zakresu procesów obsługowo-naprawczych w pojazdach szynowych można stwierdzić, że jest to zagadnienie bardzo złożone i ciągle rozwijane. Na obecnym stanie wiedzy możliwa jest osobna i wydzielona analiza i ocena dla zagadnień związanych z użytkowaniem, procesami obsługowymi i osobna dla procesów naprawczych. Dążenie do wydłużenia cyklu życia obiektów jakimi są pojazdy szynowe sprawia, że wszystkie wymienione procesy muszą być ściśle związane ze sobą.

5. Strategia planowo-zapobiegawczych napraw zapewnia najwyższe bezpieczeństwo jednak jest najdroższą strategią w zastosowaniu. Z tego względu podjęte zostały z powodzeniem dalsze prace nad nowoczesnymi metodami obsługi i napraw jak strategia NOS czy RBM.
6. Przeprowadzone analizy z badań rozpoznawczy dla pojazdów EN97 w zakresie zarejestrowanych parametrów geometrycznych kół kolejowych, pozwoliły na uszeregowanie wszystkich parametrów profilu koła od najczęściej przekraczanych do najrzadziej w zakresie zużycia zestawu kołowego.
7. Na podstawie badań rozpoznawczych na pojazdach EN76 w zakresie zużycia zestawów kołowych stwierdzono, że regresyjnymi modelami liniowymi jak i nieliniowymi możliwe jest modelowanie zarówno zmiany średnicy koła i grubości tarczy hamulcowej w funkcji przebiegu (lub czasu) jak również zużycia, a kryterium doboru modelu wynika z najwyższej wartości współczynnika determinacji.
8. Obserwacja wymiaru maksymalnej i minimalnej średnicy koła oraz grubości tarcz hamulcowych pozwala na tworzenie rozkładów częstości względnej wstępowania wymiarów *max* i *min* na poszczególnych zestawach kołowych. Pozwala to na lepszą i szybszą wizualizację, a pośrednio również informuje o szybkości zużycia kół i tarcz hamulcowych.
9. Zmiany na średnicy kół zestawów kołowych jak i zużycie kół najlepiej opisywać modelem regresyjnym modelem kwadratowym. Natomiast w przypadku tarcz hamulcowych zmiany grubości jak i ich zużycie może być opisane regresyjnym modelem liniowym w funkcji przebiegu pojazdu.
10. Określenie przybliżonego przebiegu jaki uzyskałby zestaw kołowy przy jego użytkowaniu do kresowego wymiaru można przeprowadzić zarówno modelem zmiany parametru D lub T w funkcji przebiegu lub modelem ich zużycia. W przypadku średnicy kół różnice między uzyskanymi wartościami przebiegów nie przekraczają 1%. Natomiast w przypadku tarcz hamulcowych oszacowane wartości przebiegów różnią się między sobą o około 13%.
11. Model bazujący na wynikach zmiany średnicy lub grubości tarczy zestawu kołowego jest mniej pracochłonny od modelu zużycia, wyniki przebiegu otrzymuje się szybciej przy mniejszej liczby działań matematycznych.
12. Największe wydłużenie czasu użytkowania pojazdu jak i jego przebiegu uzyskuje się na koncepcjach uszeregowanych w następującej kolejności: migracji zestawów kołowych w całym pojeździe (koncepcja ZZWP), zamiany wózków z obracaniem (koncepcja ZWZO), zamiany wózków bez obracania (koncepcja ZWBO) oraz koncepcja zamiany zestawów kołowych w wózku (ZZWO), która również przy możliwościach konstrukcyjnych wózka tożsama jest z obrotem wózka.
13. Analiza wielokryterialna przeprowadzona metodą unitaryzacji zerowej MUZ wykazała, że dla wszystkich rozpatrywanych koncepcji ocenianych na podstawie zmiennych, najlepiej wykorzystać metodę zamiany wózków bez obracania. Na drugim miejscu jest metoda zamiany wózków z obracaniem. W obu przypadkach stwierdzono największe wartości zmiennych agregatowych analizowanych wariantów mimo dużych różnic między metodami.
14. Możliwe jest opracowanie algorytmów dla zarządzania zestawami kołowymi w aspekcie zwiększenia wymiaru na średnicy koła lub grubości tarczy hamulcowej. Niezależnie od wyników metody unitaryzacji zerowanej możliwe jest wdrożenie każdej koncepcji po decyzji osoby analizującej wybrane lub wszystkie kryteria oceny wszystkich metod.
15. Badania dodatkowe przeprowadzone na wybranym elektrycznym zespole trakcyjny EN57AL dowiodły o zasadności wdrożenia 4 koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami. Zarządzanie w rozumieniu migracji pod pojazdem zarówno

zestawów kołowych jak i wózków pozwoliły na zwiększenie wartości wymiaru minimalnego, który uzyskiwał jeden z zestawów kołowych przed naprawą rewizyjną.

9.2. Wnioski praktyczne

Przeprowadzone eksploatacyjne badania rozpoznawcze oraz analizy wyników z późniejszymi propozycjami wdrożenia koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków praktycznych:

1. Najbardziej popularną i rozwijaną obecnie strategią w eksploatacji pojazdów szynowych jest strategia bazująca na stanie technicznym pojazdu, która oparta jest na zastosowaniu diagnostyki technicznej z wykorzystaniem internetu do ciągłej rejestracji różnych parametrów (wielkości fizycznych) związanych z ruchem pojazdu i towarzyszących mu procesów. Założeniem tej strategii jest identyfikacja pierwszych symptomów diagnostycznych świadczących o zmianie stanu technicznego głównych zespołów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo i trwałość jeszcze przed naprawą.
2. Parametrami najczęściej przekraczanymi na zestawie kołowym jest średnica koła D i stromość obrzeża qR . W ujęciu procentowym na wybranej grupie analizowanych pojazdów było to 43 i 33% wszystkich stwierdzonych przekroczonych parametrów.
3. Zużycia kół na średnicy tocznej są większe w okresach jesienno-zimowych względem okresów wiosenno-letnich, co szczególnie jest zauważalne na wykresach zmiany średnicy kół w funkcji przebiegu lub czasu eksploatacji.
4. Zużycia na średnicy tocznej zestawów kołowych napędnych są większe niż na zestawach tocznych. W przypadku tarcz hamulcowych sytuacja jest odwrotna, na wózkach tocznych zużycie jest większe niż na wózkach napędnych. Wynika to z faktu, że wózki toczne hamowane są tylko hamulcem ciernym, a wózki napędne hamulcem elektrodynamicznym.
5. Zwiększenie wymiaru minimalnego dla średnicy kół lub grubości tarcz hamulcowych niezależnie od wdrożonej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi jest uzależnione od liczby okresów przeznaczonych na zamianę zestawów kołowych lub wózków. Im większa liczba okresów zamiany tym większy przyrost wymiaru minimalnego dla średnicy koła D i grubości tarczy hamulcowej T .
6. Proces zarządzania zestawami kołowymi przynosi większy efekt w zakresie średnicy koła D niż grubości tarcz T . Związane jest to z zakresem wartości maksymalnego zużycia koła i tarczy hamulcowej. W przypadku koła wspomniany zakres wynosi 70 mm, a w przypadku grubości tarcz tylko 10 mm. Dla tarcz hamulcowych zalecane jest zwiększenie liczby okresów na zamianę zestawów kołowych lub wózków, co będzie zwiększać czasochłonność i podnosić koszty tej operacji. Najlepszymi (dogodnymi) okresami na zamianę zestawów kołowych lub wózków są przeglądy okresowe z dodatkowymi planowanymi przetoczeniami zestawów kołowych.
7. Największe wydłużenie czasu użytkowania pojazdu EN57AL jak i jego przebiegu uzyskano tak samo jak w przypadku analiz na pojeździe EN76, stosując koncepcje uszeregowane w następującej kolejności: migracji zestawów kołowych w całym pojeździe (koncepcja ZZWP), zamiany wózków z obracaniem (koncepcja ZWZO), zamiany wózków bez obracania (koncepcja ZWBO) oraz koncepcja zamiany zestawów kołowych w wózku (ZZWO), która również przy możliwościach konstrukcyjnych wózka tożsama jest z obrotem wózka.
8. Proces zarządzania zestawami kołowymi przynosi większy efekt jeżeli na poszczególnych przeglądach okresowych znacząco zwiększa się różnica między wymiarem maksymalnym i minimalnym koła na wszystkich zestawów kołowych, co również przekłada się na duże wartości odchylenia standardowego od wartości średniej

średnicy kół ze wszystkich zestawów kołowych. W przypadku analizowanego pojazdu EN57AL na zestawach tocznych uzyskano większe przebiegi pojazdu jak i dłuższe czasy użytkowania stosując regresyjne modele kwadratowe średnicy kół niż w przypadku zestawów napędnych.

9. Dla zestawów tocznych pojazdu EN57AL możliwe jest wydłużenie przebiegu o ponad 33 tys. km gdyż różnica między wymiarem max, a min średnicy kół w klasycznym podejściu do eksploatacji zestawów kołowych wyniosła 7,3 mm (odchylenia standardowe 2,2 mm). W przypadku zestawów tocznych uzyskano zwiększony przebieg pojazdu do 20 tys. km gdyż różnica między wymiarem max, a min średnicy kół wyniosła tylko 4,6 mm przy odchyleniu standardowym $S=1,5$ mm. Analizowany wcześniej pojazd EN76 w badaniach rozpoznawczych cechował się odchyleniem standardowym wynoszącym 12 dla zestawów napędnych i 7 mm dla zestawów tocznych. Tak znaczące wartości odchylenia standardowego bezpośrednio przekładają się bardzo duże różnice między wymiaram maksymalnym, a minimalnym ze wszystkich średnic kół i dla takich przypadków obserwuje się największy wzrost wymiaru minimalnego jednego z zestawów kołowych na ostatnim planowanym przeglądzie okresowym.

9.3. Propozycja kierunków dalszych badań

Kierunki dalszych prac w zakresie oceny zużycia zestawów kołowych i wdrożenia koncepcji zarządzania zestawami kołowymi lub wózkami są następujące:

1. Opracowanie rozszerzonej metodyki badań zjawisk kontaktowych koło-szyna i koło-wstawka hamulcowa z jednoczesnym uwzględnieniem tarcia mechanicznego, adhezyjnego, adhezyjno-mechaniczne, czy molekularnego. Doprowadzi to do poznania zjawisk wpływających na propagację procesu zużycia i opracowanie mechanizmów spowalniających ten proces.
2. Rozbudowa koncepcji ZZWP zamiany zestawów kołowych o dodatkowy ich obrót z oceną możliwości przyrostu wymiaru minimalnego średnicy koła oraz ograniczeń techniczno-organizacyjnych jako piątej koncepcji zarządzania zestawami kołowymi pod wieloczołowym zespołem trakcyjnym.
3. Zastosowanie narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji jak sztuczna inteligencja *AI* w jednoczesnym zarządzaniu zestawami kołowymi i wózkami w celu zarówno wyboru danej koncepcji jak wskazania najlepszej propozycji zamiany zestawów lub wózków w różnych okresach eksploatacji pojazdów z uwzględnieniem rozszerzonych kryteriów oceny.

LITERATURA

- [1] Adamiec P., Witaszek M., Witaszek K.: Intensywność zużycia stali na obręcze kół kolejowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1998, Seria: Transport, zeszyt 30, s. 71-78.
- [2] Adamkiewicz A., Burnos A.: Kluczowe wskaźniki efektywności w utrzymaniu silników spalinowych w układach energetycznych jednostek pływających, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej 2012; 2(189), s. 5-16.
- [3] Biliński J., Buta S., Gmurczyk P., Kaska J.: Asynchroniczny napęd z hamowaniem odzyskowym do elektrycznych zespołów trakcyjnych serii EN57 i EN71. TTS 2009; 10, s. 38-44.
- [4] Brodny J.: Modelowanie tarcia w układach mechanicznych. Górnictwo i geologia 2010, tom 5, zeszyt 2, s. 7-17.
- [5] Chudzikiewicz A., Góra I.: Modelowanie i koncepcja badań symulacyjnych właściwości dynamicznych kolejowego zestawu kołowego z zastosowaniem innowacyjnych powłok samosmarnych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport 2017, zeszyt 118, s. 75-84.
- [6] Chudzikiewicz A., Sowiński B., Szulczyk A.: Zagrożenie bezpieczeństwa ruchu pojazdów szynowych spowodowane stanem toru. Problemy eksploatacji 2009; 4, s. 177-192.
- [7] Chukowski T., Kiciński M.: Analiza zużycia wieńca koła zestawów kołowych pojazdów szynowych. Autobusy 2018; 12, s. 1026-1029.
- [8] Czechyra B., Firlik B.: System monitorowania on-line stanu technicznego infrastruktury i układu biegowego lekkiego pojazdu szynowego, Przegląd Komunikacyjny, 2011; 2, s. 6-10.
- [9] Czechyra B., Tomaszewski F., Nowakowski T., Orczyk M.: Repeatability of Vibroacoustic Processes of Tram Diagnostics in Normal Operating Conditions, 3rd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 5-8.04.2016, Cagliari, s. 1-9.
- [10] Dokumentacja Systemu Utrzymania elektrycznego zespołu trakcyjnego typu 33WE. Bydgoszcz, kwiecień 2013.
- [11] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego Typu 33WE. PESA, Bydgoszcz 2011.
- [12] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa Elektrycznego zespołu trakcyjnego typu 22WEa-EN76, DTR 22WE 0159-1, PESA Bydgoszcz SA.
- [13] Dokumentacja Systemu Utrzymania 2012, Elektryczny zespół trakcyjny typu 22WEa-EN76, PESA Bydgoszcz SA, s. 20-21.
- [14] Dokumentacja Systemu Utrzymania Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego typu 5B+6B+5B po modernizacji przeprowadzonej przez ZNTK Mińsk Mazowiecki S.A. (oznaczenie serii EN57AL). Koleje Dolnośląskie S.A. 2013.
- [15] Dokumentacja Systemu Utrzymania EN 57AL-0130-1 Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego typu 5B+6B+5B (oznaczenie serii EN57AL). Przewozy Regionalne Sp. z o.o. 2010.
- [16] Dokumentacja Systemu Utrzymania elektrycznego zespołu trakcyjnego serii EN57/EN71 oraz EN57 SPOT. Przewozy Regionalne Sp. z o.o. Warszawa 2010.
- [17] Dokumentacja Systemu Utrzymania Zmodernizowany Elektryczny Zespół Trakcyjny typu EN57AL (5B+6B+5B). Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o. 2017.
- [18] Dudzik M.: Metodyka obliczania największego możliwego przyspieszenia ograniczonego warunkiem przyczepności dla pojazdu trakcyjnego na przykładzie

- pojazdu FLIRT ED 160 firmy Stadler. *Problemy Transportu i Logistyki* 2018; 3(43), s. 21-31.
- [19] Dusza M.: Stateczność rozwiązań i bezpieczeństwo ruchu po łuku modelu pojazdu szynowego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport* 2016, zeszyt 109, s. 21-44.
- [20] Duda S.: Modelowanie i symulacja numeryczna zjawisk dynamicznych w elektrycznych pojazdach szynowych. Monografia Wydawnictwa Politechniki Śląskiej 2012.
- [21] Dusza M.: Dynamika ruchu modelu pojazdu szynowego po torze prostym z nierównością pionową. *Problemy Kolejnictwa* 2018, 181, s. 17-23.
- [22] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, dnia 15 września 2023 r. Poz. 1893. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 14 września 2023 r. w sprawie wysokości minimalnego wynagrodzenia za pracę oraz wysokości stawki godzinowej w 2024 r.
- [23] Encyklopedia Powszechna. PWN Warszawa 2000.
- [24] Far M. Charakterystyka techniczna elektrycznego zespołu trakcyjnego typu 33WE. Instytut Pojazdów Szynowych w Poznaniu, Poznań 2011.
- [25] Firlik B., Staśkiewicz T.: Challenges and opportunities of tram wheel profile design. *Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance 2022*, s. 1-7.
- [26] Florek J., Barczak A.: Procesy informacyjno-decyzyjne w eksploatacji obiektów technicznych. *Telekomunikacja i techniki informacyjne*, 2004; 1-2, s. 31-41.
- [27] Gill A.: Metoda wyznaczania struktury cyklu napraw elementów pojazdów szynowych. *Pojazdy Szynowe* 2004; 3-4 s. 38-42.
- [28] Gill A., Kadziński A.: System obsługi pojazdów szynowych jako element w warstwowym modelu ich systemów bezpieczeństwa. *Pojazdy Szynowe* 2006; 4, s. 31-38.
- [29] Gill A., Kadziński A.: Idea identyfikacji warstw modeli systemów bezpieczeństwa obiektów w transporcie. *Logistyka* 2011; 3, s. 717-726.
- [30] Gugalka T., Gąszczak J.: Diagnostyka zestawu kołowego w taborze podczas jazdy oraz sposoby i metody usuwania stwierdzonych usterek w zestawie na przykładzie Zakładu Taboru w Szczecinie. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 1999, Seria: Transport, zeszyt 39, s. 47-55.
- [31] Guzowski S., Michnej M.: Analiza wymiarowa w badaniach modelowych zużycia zestawów kołowych. *Problemy Kolejnictwa* 2015, zeszyt 169, s. 7-14.
- [32] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1980.
- [33] Instrukcja MKT-9 Instrukcja pomiarów i oceny technicznej zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych. Majkoltrans Sp. z o.o. Wrocław 2018.
- [34] Jakuszko W., Medwid M., Orczyk M.: Przykłady modelowania niekonwencjonalnych rozwiązań szynowych układów jezdnych. *Rail Vehicles* 2020, 1, s. 10-23.
<https://doi.org/10.53502/RAIL-138497>
- [35] Kałuża E.: Analiza czynników ograniczających parametry trakcyjne lokomotyw elektrycznych o układzie osi CoCo, zasilanych z sieci 3 kV DC. *Technika transportu szynowego* 10/2009, s. 68-72.
- [36] Kisielińska J.: Sieci neuronowe i modele regresyjne w analizach zależności przyczynowo-skutkowych. *Wiadomości Statystyczne. The Polish Statistician* 2003; 3, s. 79-89.
- [37] Konowrocki R., Chojnacki A.: Analiza niezawodności eksploatacyjnej pojazdów szynowych w aspekcie bezpieczeństwa przed wykolejeniem w oparciu o różne metody wyznaczania kryterium oceny. *Eksploatacja i Niezawodność* 2020; 22(1), s. 73-85,
<https://doi.org/10.17531/ein.2020.1.9>

- [38] Kortas P.: Zużycie i reprofilacja kół pojazdów kolejowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 2013, Seria: Transport, zeszyt 79, s. 61-69.
- [39] Kostencki P.: Intensywność zużycia stali pracującym w pyłe zwykłym, wyznaczona w warunkach polowych. Inżynieria Rolnicza 2009; 1(110), s. 139-146.
- [40] Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A.: Statystyka podręcznik dla studiów ekonomicznych. Difin 2022.
- [41] Kowalski S., Lachowski P.: Wybrane uszkodzenia i zużycia zestawów kołowych pojazdów szynowych. Autobusy 2018; 12, s. 480-485.
<https://doi.org/10.24136/atest.2018.437>
- [42] Krężołek D.: Model regresji grzbietowej i jego wykorzystanie do oceny ryzyka inwestycyjnego – przypadek rynku metali. Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach 2016; 288, s. 21-32.
- [43] Królikowski T., Rypina Ł., Nikończuk P., Bałasz B., Concept of the target function selection for the optimization of abrasive machining process using. Mechanik 2014; 9, s. 239-241.
- [44] Kukuła K., Bogocz D. Zero Unitarization method and its application in ranking research in agriculture. Economic and Regional Studies 2014; 7(3): 5-13.
- [45] Kustosz J, Goliwas D, Kaluba M. A tool for calculating braking distances of rail vehicles. Rail Vehicles 2022; 3-4, s. 15–19.
<https://doi.org/10.53502/RAIL-156462>
- [46] Kwaśnikowski J., Małdziński L., Borowski J., Firlik B., Gramza G.: Analiza przyczyn przyspieszonego zużycia powierzchni toczyń kół autobusu szynowego SA 108 (215M). Pojazdy Szynowe 2007; 2, s. 1-52.
- [47] Lee DY., Kwon HJ., Choi K.: Risk-based maintenance optimization of aircraft gas turbine engine component. Proceedings of the institution of mechanical engineers part O-Journal of risk and reliability 2022, s. 5541-5561.
- [48] Legutko S.: Eksploatacja maszyn. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2007.
- [49] Legutko S.: Podstawy eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2009.
- [50] Leszek W., Badania empiryczne, Studia i rozprawy – Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1977.
- [51] Leus M., Gutowski P.: Dynamiczne modele tarcia w analizach wpływu drgań kontaktowych stycznych na siłę tarcia w ruchu ślizgowym. Tribologia 2009; 3, s. 77-86.
- [52] Li H., Li L., Yu X., Li Z., Sun Y.: Research on the influence of time-varying wear of wheel-rail profile on vehicle dynamic response. Tribology International 2024, Available online 10 August 2024: 1-28
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110095>
- [53] Li J.X., Wu B.N., Ding H.H., Galas R., Omasta M., Wen Z.F., Guo J., Wang W.J.: Wear and damage behaviours of wheel and rail materials: Effects of friction modifier and environmental temperature. Wear 2024; 523 (204796), s. 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204796>
- [54] Lipiński L., Miszewski M.: Wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych pojazdów kolejowych z asynchronicznymi napędami trakcyjnymi. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne 2023; 1(94), s. 67-74.
- [55] Lopez JC., Kolios A.: Risk-based maintenance strategy selection for wind turbine composite blade. Energy Reports 8, s. 5541-5561.
<https://doi.org/10.1177/1748006X221135907>
- [56] Loska A.: Modelowy sposób funkcjonowania służb utrzymania ruchu - strategie eksploatacyjne, Służby Utrzymania Ruchu 2010; 3, s. 58–64.

- [57] Loska A.: Exploitation assessment of selected technical objects using taxonomic Methods. *Polskie Naukowo -Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne* 2013 15(1), s. 1-8.
- [58] Madej J.: Analiza efektywności trakcyjnej zestawu kół pojazdu szynowego w łuku toru o małym promieniu. *Pojazdy Szynowe* nr 2008; 1, s. 1-6.
- [59] Magiera J.: Niezawodnościowa strategia obsługiwaniania pojazdów szynowych. XIII Konferencja Naukowa *Pojazdy Szynowe* 98, Seria: *Transport* z.32, nr kol. 1393, s. 141-149.
- [60] Marciniak Z.: Modernizacja elektrycznych zespołów trakcyjnych serii EN57, EN71 i EW60. Stan obecny i zamierzenia. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe* 2009; 1, s. 15-25.
<https://doi.org/10.53502/RAIL-139747>
- [61] Mazur T., Małek A.: Zarządzanie eksploatacją systemów technicznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1979.
- [62] Michnej M.: Proces zużycia w połączeniu obrotowym na przykładzie modelu zestawu kołowego z samoczynną zmianą rozstawu kół. *Czasopismo techniczne 7-M/2012*, zeszyt 14, rok 109. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s. 159-166.
- [63] Moczarski M.: Podejście systemowe przy rozwiązywaniu problemów obsługiwaniania obiektów technicznych. *Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 149 (2009)*, s. 67-88.
- [64] Moczarski M.: Podstawy organizacji i techniki obsługiwaniania pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1986.
- [65] Nosal S.: Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2012.
- [66] Neale MJ.: Tribology Handbook. Published in association with the Committee on Tribology of the Department of Trade and Industry, London 1975.
- [67] Niziński S.: Eksploatacja obiektów technicznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom 2002.
- [68] Niziński S., Żółtowski B.: Zarządzanie eksploatacją obiektów technicznych za pomocą rachunku kosztów. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. Olsztyn 2002.
- [69] Pezowicz C.: Wybrane zagadnienia budowy i eksploatacji maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2016.
- [70] Piec P.: Studium eksploatacyjne zużycia zestawów kołowych pojazdów szynowych w aspekcie holistycznej tribologii. *Logistyka* 2015; 6, s. 1235-1250.
- [71] Piec P.: Analiza zużycia wieńca koła zestawów kołowych pojazdów szynowych. *Logistyka* 2014; 3, s. 5060-5068.
- [72] PN-EN 15341:2007, Obsługa-Kluczowe wskaźniki efektywności obsługi.
- [73] Pourjavad E., Shirouyehzad H., Shahin A.: Analyzing RCM Indicators in Continuous Production Lines A Case Study. *International Business Research*, 2011 4(4), s. 115-123.
<https://doi.org/doi:10.5539/ibr.v4n4p115>
- [74] Powierża L., Eksploatacja, eksploatyka, eksploatologia-czyli kongwistyka eksploatacyjna. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2001 2(126), s. 235-246.
- [75] Przybyszewski M.: Elektryczne zespoły trakcyjne. Budowa, działanie, zasady utrzymania i obsługi. WKŁ 2017.
- [76] Raport roczny WKD 2021, kolej samorządowa, strona inter-netowa:
<https://www.wkd.com.pl/o-wkd/raporty/raporty/2884-2021>
- [77] Romaniszyn Z.: Podwozia wózkowe pojazdów szynowych. Kraków 2010.
- [78] Ross AM., Rasor B., Moleski H.: How Reliability Centered Maintenance (RCM) Will Affect System Reliability. *IEEE/PES Transmission and distribution Conference and Exposition (T&D)* 2018.

- [79] Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) nr 402/2013 z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w zakresie wyceny i oceny ryzyka i uchylające rozporządzenie (WE) nr 352/2009.
- [80] Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2015/1136 z dnia 13 lipca 2015 r. zmieniające rozporządzenie wykonawcze (UE) nr 402/2013 w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w zakresie wyceny i oceny ryzyka.
- [81] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2018/545 z dnia 4 kwietnia 2018 r. ustanawiające uzgodnienia praktyczne na potrzeby procesu udzielania zezwoleń dla pojazdów kolejowych i zezwoleń dla typu pojazdu kolejowego zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797.
- [82] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2018/762 z dnia 8 marca 2018 r. ustanawiające wspólne metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do wymogów dotyczących systemu zarządzania bezpieczeństwem na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 oraz uchylające rozporządzenia Komisji (UE), nr 1158/2010 i (UE) nr 1169/2010.
- [83] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (tj.: Dz.U. 2016, poz. 226 z późn. zm.).
- [84] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 18 lipca 2005 w sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji (tj.: Dz. U.2015, poz. 360, z późn. zm.).
- [85] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 15 lutego 2005 r. w sprawie świadectw sprawności technicznej pojazdów kolejowych (Dz. U. z 2005, nr 7, poz. 330).
- [86] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu Tabor — lokomotywy i tabor pasażerski systemu kolei w Unii Europejskiej (TSI LOC&PAS).
- [87] Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/779 z dnia 16 maja 2019 r. ustanawiające szczegółowe przepisy dotyczące systemu certyfikacji podmiotów odpowiedzialnych za utrzymanie pojazdów zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 oraz uchylające rozporządzenie Komisji (UE) nr 445/2011.
- [88] Sawicki P., Tomaszewski T., Assesment of chosen freeware applications for 3D modeling of close range object. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 2010; 21, s. 363–374.
- [89] Sawczuk W., Rilo Cañas A., Kołodziejski S.: Testing the wear of wheelsets of EN97 series vehicles in terms of geometrical parameters of the wheel profile in two-year operation, *Rail Vehicles* 2023; 1-2, s. 38-45
<https://doi.org/10.53502/RAIL-171570>
- [90] Shi K., Hu X.S., Mo X.Q., Xu H., Wang Z.L., Ma W.R., Yang Y.B.: Theory for computing vehicle-rail contact responses from a multi-DOF test vehicle and detecting track modulus and rail damages. *Applied Mathematical Modelling* 2023; 121, s. 403-429.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.05.008>
- [91] Słowiński MS. Charakterystyka wybranych rodzajów zużycia koła i ich wpływ na współpracę pojazdu szynowego z torem. *Rail Vehicles* 2022; 1-2, s. 3-9.
<https://doi.org/10.53502/RAIL-147440>
- [92] Słowiński MS. Materiały stosowane w budowie kół pojazdów szynowych. *Rail Vehicles* 2021; 4: 14-24.
<https://doi.org/10.53502/RAIL-144535>

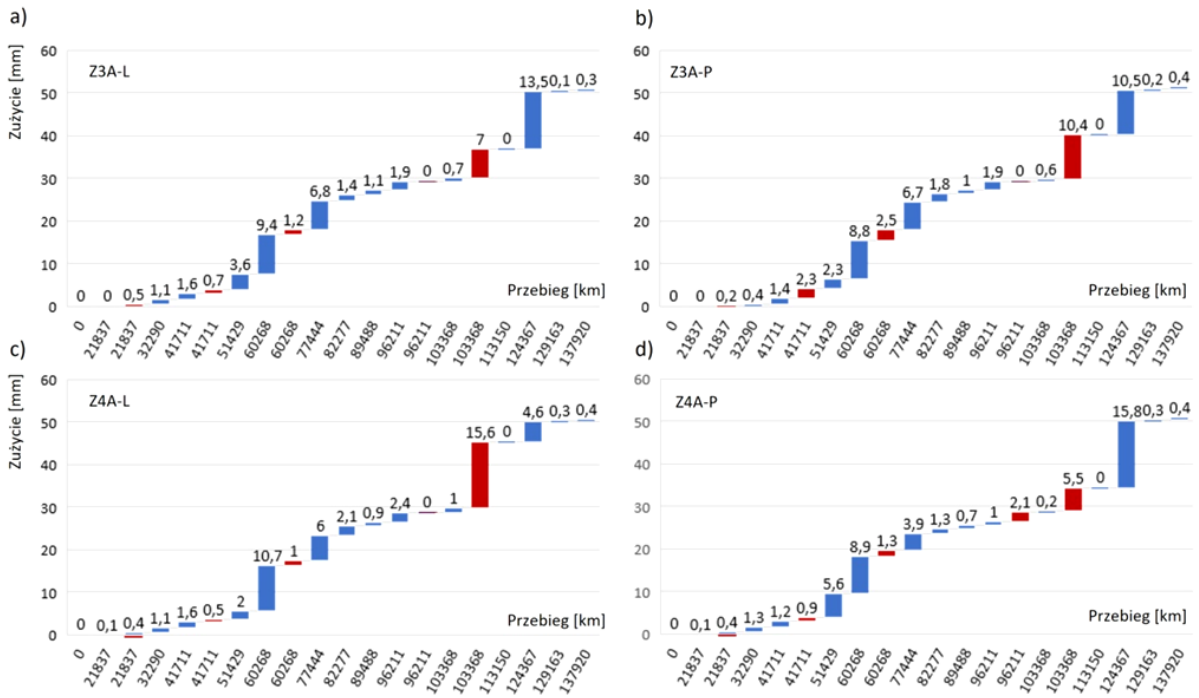
- [93] Smoczyński P., Gill A., Motyl M., Babiak A.: How to do it with sticky notes: a method for exploring expert knowledge to prepare guidelines for practice in railway vehicle maintenance. *Transport Problems* 2021; 16(1), s. 153-164.
<https://doi.org/10.21307/tp-2021-013>
- [94] Smolnik M., Wiązania G., Szybka J.: Koncepcja oceny systemu eksploatacji środków transportu komunikacji miejskiej. *Technika Transportu Szynowego TTS* 2014; 10, s. 16-20.
- [95] Sobaś M.: Development trends in the construction of gear running systems of rail vehicles (parts 2). *Rail Vehicles* 2017; 4, s. 15-30
<https://doi.org/10.53502/RAIL-138433>
- [96] Sobaś M., Antkowiak T., Grzechowiak R., Miklasz R.: Development trends in the construction of gear running systems of rail vehicles (part 1). *Rail Vehicles* 2017; 3, s. 33-51.
- [97] Sobaś M.: Stan i doskonalenie kryteriów bezpieczeństwa przed wykolejeniem pojazdów szynowych (1). *Pojazdy Szynowe* 2005; 4, s. 1-13.
<https://doi.org/10.53502/RAIL-139807>
- [98] Sobaś M.: Stan i doskonalenie kryteriów bezpieczeństwa przed wykolejeniem pojazdów szynowych (2). *Pojazdy Szynowe* 2006; 2, s. 37-48.
<https://doi.org/10.53502/RAIL-139819>
- [99] Sowa A.: Teoria eksploatacji i diagnostyka pojazdów szynowych, Zagadnienia wybrane. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2019.
- [100] Sowiński B., Szulczyk A., Kozak S.: Ocena dynamiki lekkiego pojazdu szynowego z wykorzystaniem opracowanego pakietu komputerowego. *TTS Badania* 2016; 12, s. 216-222.
- [101] Stajniak M., Konecka S., Szopik-Depczyńska K.: Algorytm obsługi transportowej ładunków w procesie zaopatrzenia. *Autobusy* 2017; 6, s. 1536-1538.
- [102] Starzyński G.: Naturalna warstwa wierzchnia metali – opis fizyczny i model fenomenologiczny. Rozprawa doktorska, Warszawa 1998.
- [103] strona internetowa: <https://kurier-kolejowy.pl/aktualnosci/40262/24-lata-pod-katastrofie-pod-eschede-wykoleil-sie-pociag-regionalny-w-poblizu-garmisch-partenkirchen.html> (30.08.2023 r.)
- [104] strona internetowa: <https://kurier-kolejowy.pl/aktualnosci/42498/wypadek-kolejowy-w-eschede-25-lat-temu---czas-nie-leczy-wszystkich-ran.html> (30.08.2023 r.)
- [105] strona internetowa: <https://jarekgronert.pl/katastrofy-kolejowe/> (30.08.2023 r.)
- [106] strona internetowa:
<http://www.psmkms.krakow.pl/index.php/kolej/elektryczne-zespoly-trakcyjne/390-en76>
(dostęp 12.06.2024 r.).
- [107] strona internetowa:
<https://www.kolejeslaskie.com/spolka/tabor/ezt-34wea-elf-2/>
(dostęp 12.06.2024 r.).
- [108] strona internetowa:
<https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/elfy-dla-kolei-mazowieckich--umowa-podpisana-59603.html>
(dostęp 12.06.2024 r.).
- [109] strona internetowa:
<https://pesa.pl/produkty/elektryczne-zespoly-trakcyjne/elf/>
(dostęp 12.06.2024 r.).
- [110] strona internetowa:
<https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/mapy>
(dostęp 12.06.2024 r.).

- [111] Strona internetowa: https://kolejnictwopolskie.pl/baza-wiedzy/programy-inwestycyjne?article_lang=pl
(dostęp 12.06.2024 r.).
- [112] strona internetowa: <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/pesa-jednostka-654-to-najnowoczesniejszy-pojazd-w-naszym-portfolio-111121.html>
(dostęp 12.06.2024 r.).
- [113] strona internetowa: <https://www.skyscrapercity.com/threads/bydgoszcz-pesa-g%C5%82upie-dyskusje-brig-co-do-zasady-dla-user%C3%B3w-z-min-50-postami.552245/page-1442>
(dostęp 12.06.2024 r.).
- [114] strona internetowa: <https://kolej.mkm.szczecin.pl/encyklopedia/en57a1>
(dostęp 04.08.2024 r.).
- [115] strona internetowa: https://pl.wikipedia.org/wiki/Pafawag_5B/6B
(dostęp 04.08.2024 r.).
- [116] Szwabowski J., Deszcz J., Metody wielokryterialnej analizy porównawczej. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2001.
- [117] Szwedzka K.: Metodyka badań efektywności eksploatacji złożonych systemów technicznych w przedsiębiorstwach branży meblarskiej. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2019.
- [118] Szwedzka K., Jasiulewicz–Kaczmarek M.: Determining Maintenance services using production performance indicators. Research in Logistic & Production 2016; 6(4), s. 361-374.
- [119] Szwedzka K., Szafer, P., Wyczółkowski R.: Structural analysis of factors affecting the effectiveness of complex technical systems, Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), 8-2017; 9, s. 4096–4105.
- [120] Szudyga M.: Diagnostowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych stali stosowanej do kół i obręczy kolejowych zestawów kołowych. Rozprawa doktorska, Katowice 2011.
- [121] Szymański G.M., Zagadnienia diagnostyki silników spalinowych z wykorzystaniem drgań rezonansowych. Rozprawa nr 500, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013, s. 88-89.
- [122] Tarełko W.: Metodologia projektowania właściwości eksploatacyjnych złożonych obiektów technicznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Gdynia 2011.
- [123] Tatar K., Chudzik P.: Modelowanie wpływu niezależnego sterowania kół lewych i prawych na zachowanie dynamiczne pojazdu. Napędy i Sterowanie 2017; 3, s. 130-135.
- [124] Tomaszewski A., Efektywność modyfikacji algorytmu genetycznego w optymalizacji złożonych systemów oświetlenia elektrycznego. Electrical Engineering 2013; 73, s. 172-182.
- [125] Tomczyk W.: Uwarunkowania racjonalnego procesu użytkowania maszyn i urządzeń rolniczych. Inżynieria Rolnicza 2005; 7, s. 359-366.
- [126] Tomlinsong PD.: Reliability Centered Maintenance. Equipment management: Key to equipment reliability and productivity in mining 2010, s. 119-138.
- [127] Topp J.: Matematyka. Funkcje jednej zmiennej. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego 2016.
- [128] Tosangthum N., Krataitong R. Wila P., Koiprasert H., Buncham K., Kansuwan P., Manonukul A. Sheppard P. Dry rolling-sliding wear behavior of ER9 wheel and R260 rail couple under different operating conditions. Wear 2023; 518-519(204636), s 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204636>

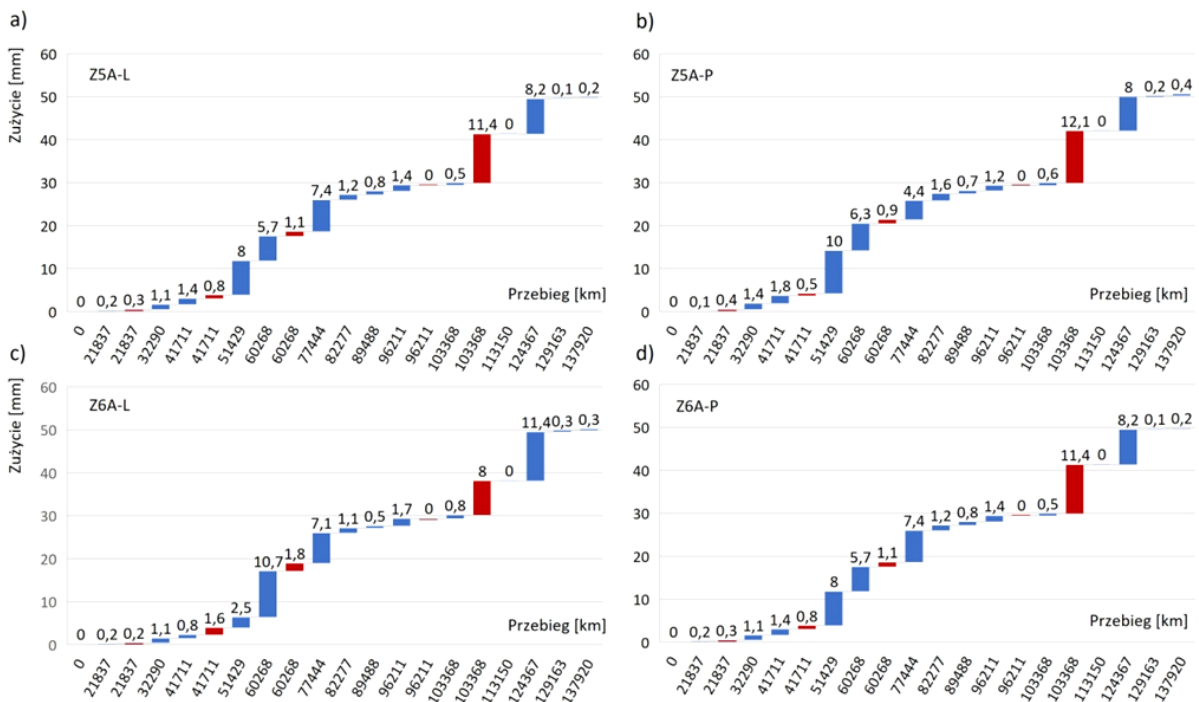
- [129] Tubielewicz K., Chmielnik I.P., Michalczyk H: Modelowanie powstawania naprężeń w warstwie wierzchniej. *Mechanik* 2018; 7, s. 479-481.
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.60>
- [130] Wang P. , Yang X., Tao G., Wen Z.: Development of a wheel wear prediction model considering the interaction of abrasive block–wheel and wheel–rail. *Wear* 2024; 550-551(205418), s 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205418>
- [131] Wang W., Huang J., Ding H., Wen Z., Cui X., Lewis R., Liu Q.: Initiation and evolution of wheel polygonal wear: Influence of wheel-rail hardness ratios. *Wear* 2024; 540-541(205255), s. 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205255>
- [132] Wieteska S., Piechota A.: Nowoczesne metody zarządzania flotami samochodów ciężarowych i dostawczych w Polsce. *Acta Scientifica Academiae Ostroviensis. Sectio A, Nauki Humanistyczne, Społeczne i Techniczne* 2016; 8(2), s. 105-119.
- [133] Wu Q., Bernal E., Spiriyagin M., Krishna V., Ding H., Stichel S., Cole C.: Heavy haul rail/wheel wear and RCF assessments using 3D train models and a new wear map. *Wear* 2024; 538-539(205226), s. 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205226>
- [134] Wu X., Zhang Z., Cai W., Yang N., Wang W., Liu K., Chi M., Wen Z., Liang S.: A study of the axle box ASD spectrum of high-speed rail vehicles based on field test measurements in China. *Engineering Failure Analysis* 2023; 154(107681), s. 1-17.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107681>
- [135] Zadrąg R., Kniaziewicz T., Utilization of the zero unitarization method for the building of a ranking for diagnostic marine engine parameters. *Combustion Engines* 2017; 171(4), s. 44-50.
<https://doi.org/10.19206/ce-2017-408>
- [136] Zajac G., Jurga S.: Badania trwałości obręczy kół tramwajowych eksploatowanych w MPK S.A. w Krakowie. *Problemy Eksploatacji* (2) 2009, s. 139-148.
- [137] Zajac G., Jurga S.: Energochłonność pojazdów komunikacji miejskiej. *Autobusy, Eksploatacja i testy* 2017; 6, s. 1142-1146.
- [138] Zajac G.: Wieloaspektowe badania empiryczne z zakresu zużycia obręczy kół pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2019.
- [139] Zasadzień M., Skotnicka-Zasadzień B.: Zastosowanie miar niezawodności do analizy awaryjności kluczowych maszyn w przedsiębiorstwie produkcyjnym – studium *Systems Supporting Production Engineering* 2013, 4(6), s. 165-175.
- [140] Zbieć A.: Przyczyny nierównomiernego zużywania się zestawów kołowych w wagonach towarowych. *Prace Instytutu Kolejnictwa* 2017; 155, s. 43-47.
- [141] Żółtowski B., Żółtowski M.: Improvement the system of exploitation machine. *Journal of KONBiN* 2011; 4(20), s. 119-132.

ZAŁĄCZNIK A

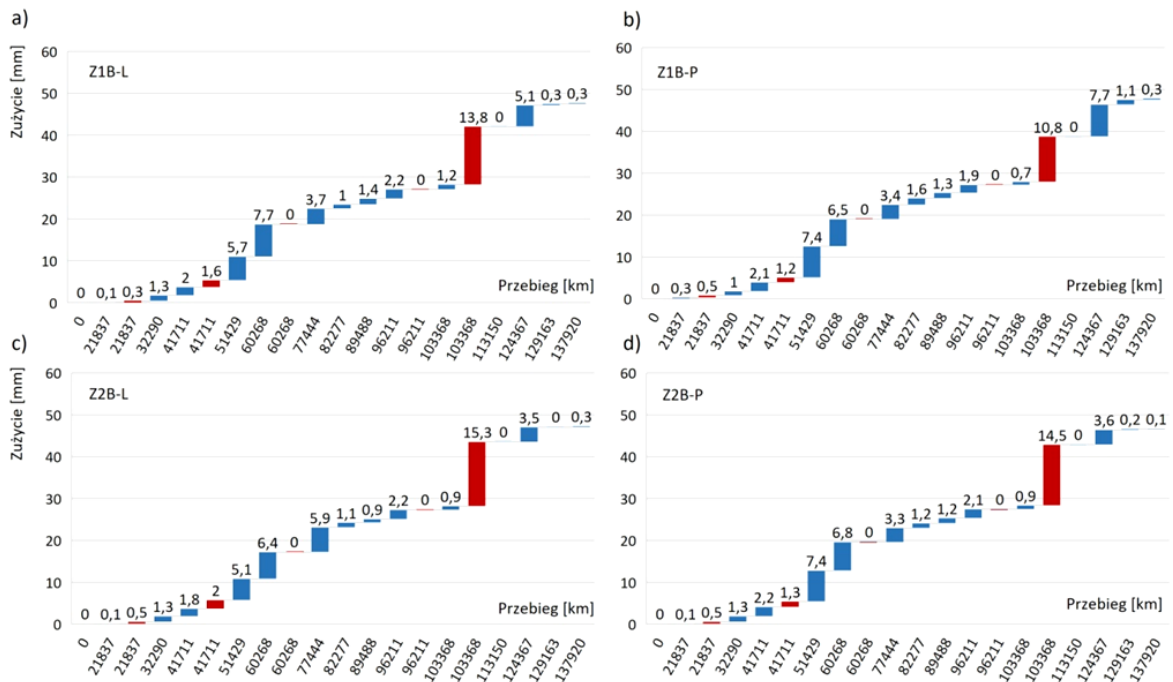
Wykresy zużycia zestawów kołowych



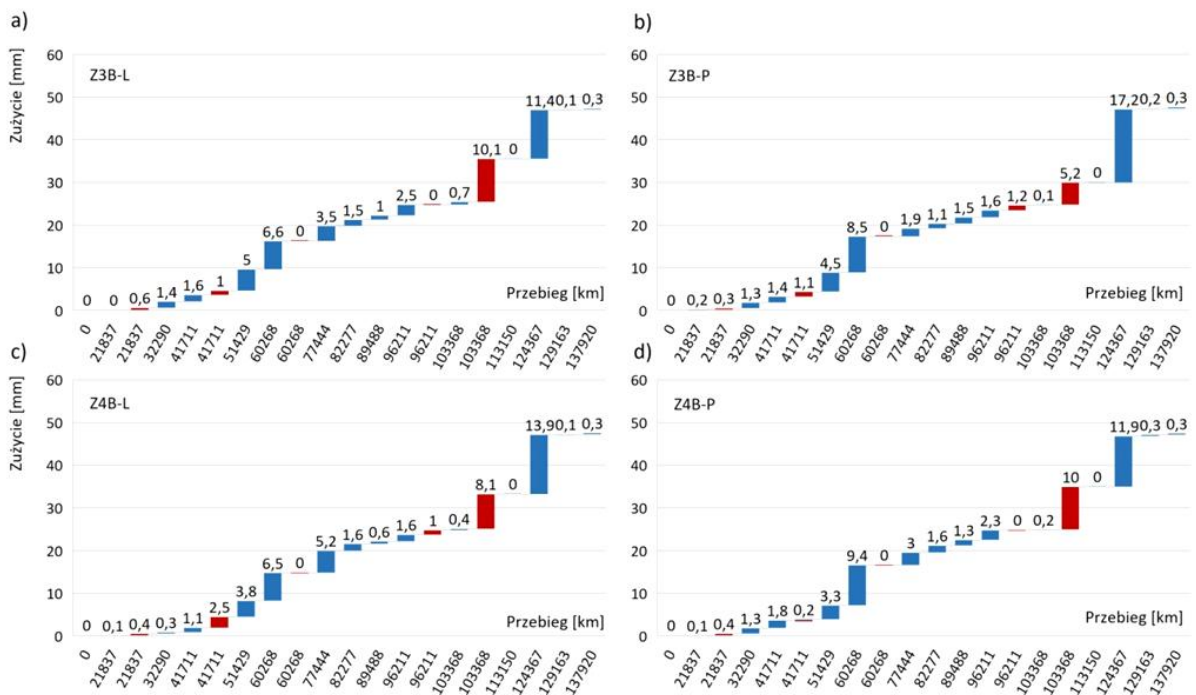
Rys. 3.31. Zużycie koła: a) Z3A-L, b) Z3A-P, c) Z4A-L, d) Z4A-P na drugim wózku (tocznym) pojazdu 006 (trójczłon A) zarejestrowane podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



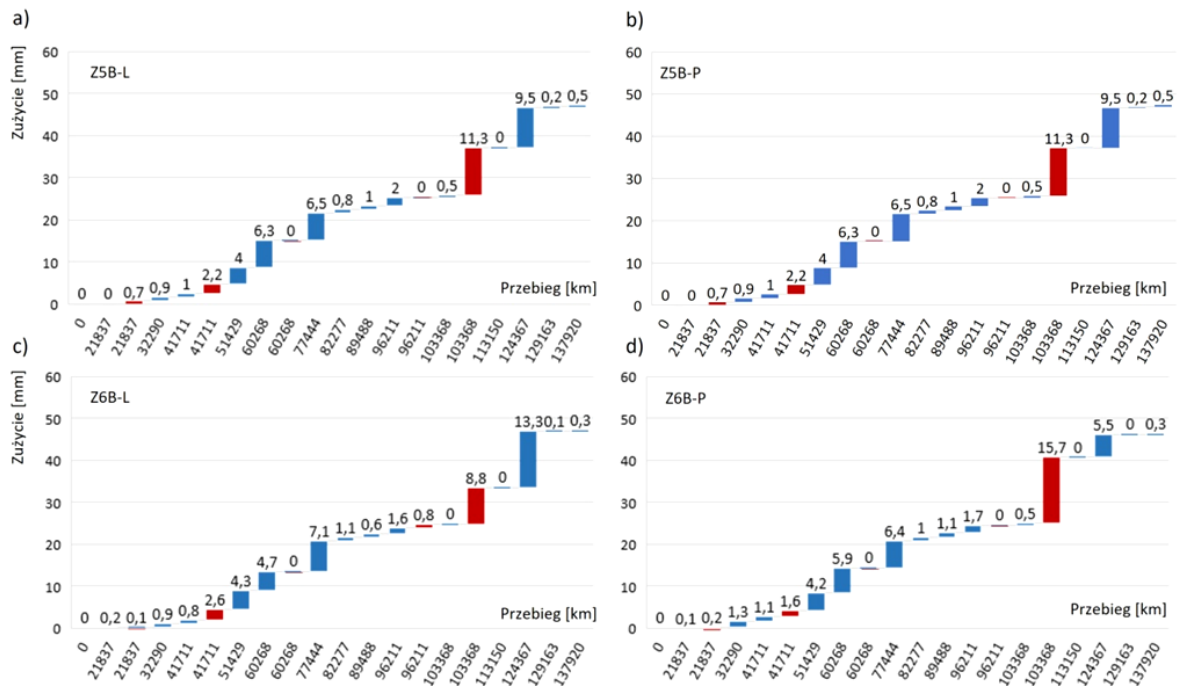
Rys. 3.32. Zużycie koła: a) Z5A-L, b) Z5A-P, c) Z6A-L, d) Z6A-P na trzecim wózku (napędym) pojazdu 006 (trójczłon A) zarejestrowane podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



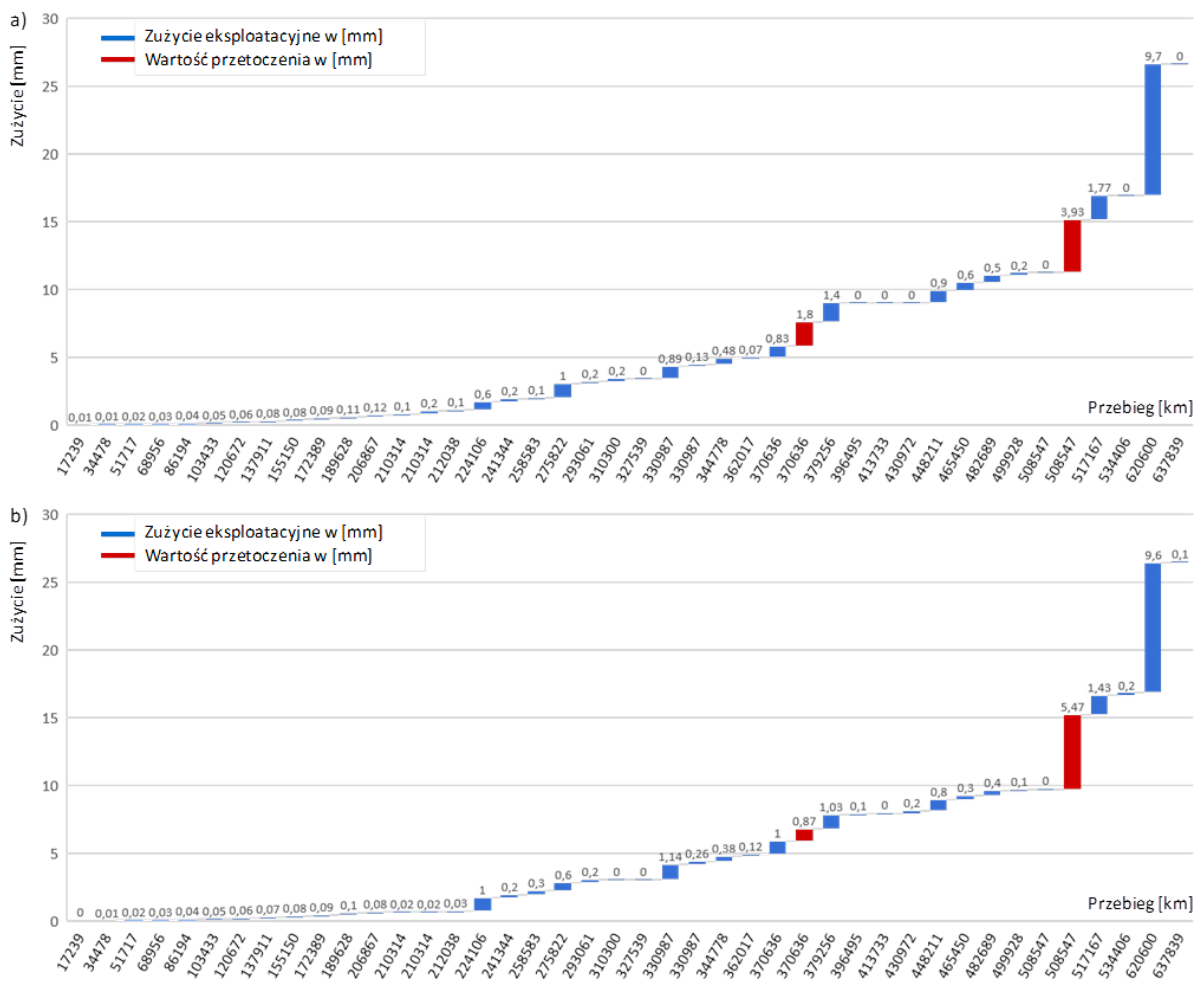
Rys. 3.33. Zużycie koła: a) Z1B-L, b) Z1B-P, c) Z2B-L, d) Z2B-P na czwartym wózku (napędnym) pojazdu 006 (trójczłon B) zarejestrowane podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



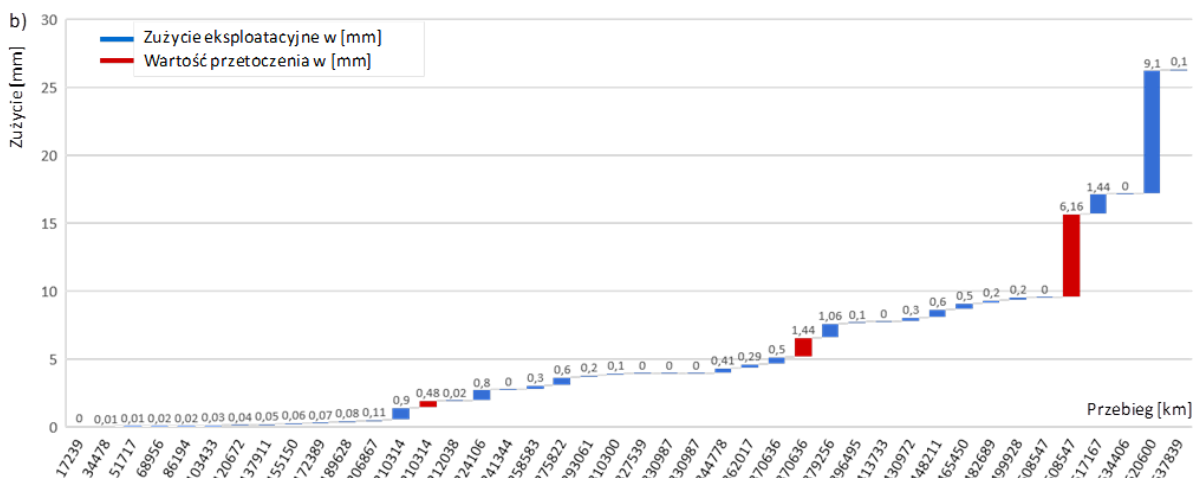
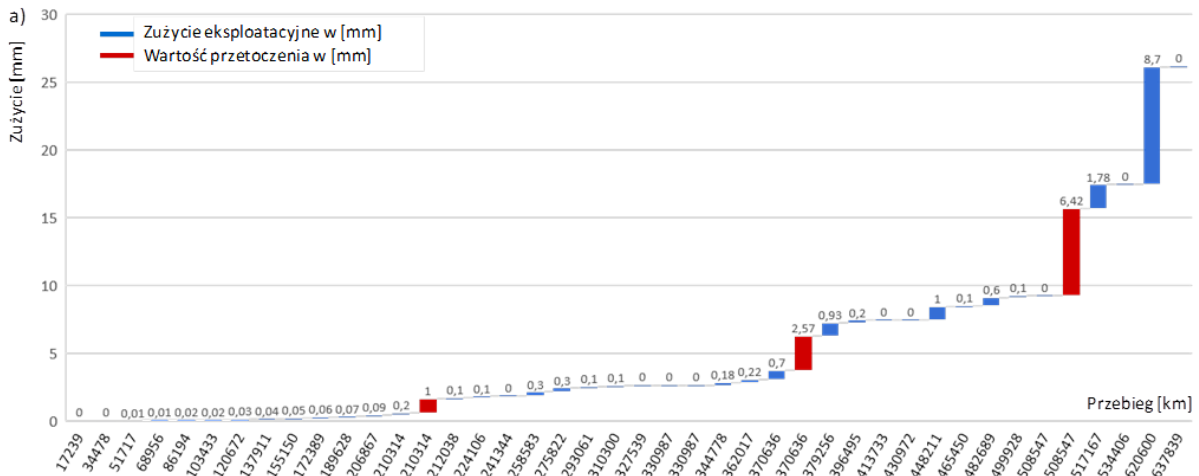
Rys. 3.34. Zużycie koła: a) Z3B-L, b) Z3B-P, c) Z4B-L, d) Z4B-P na piątym wózku (tocznym) pojazdu 006 (trójczłon B) zarejestrowane podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



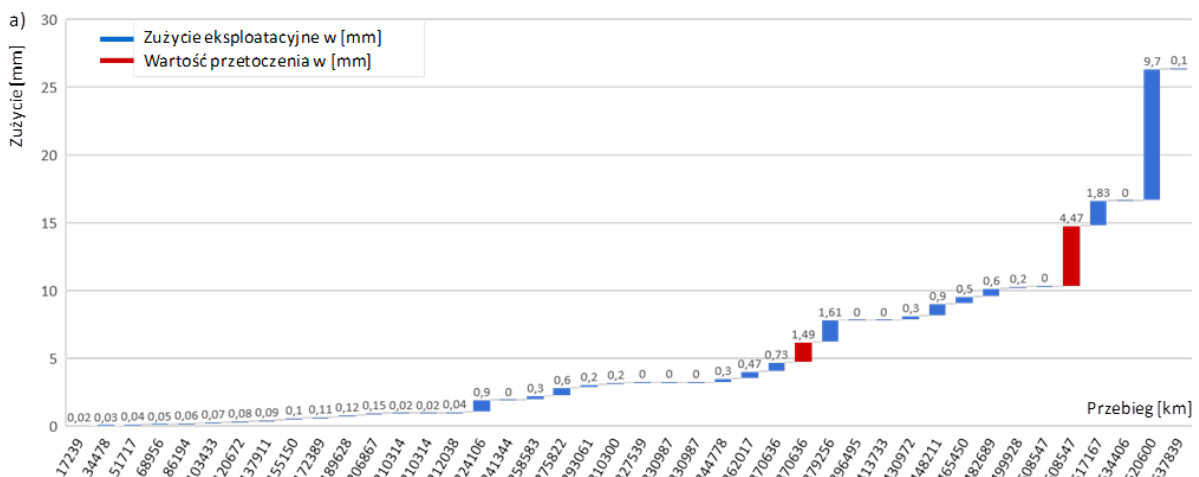
Rys. 3.35. Zużycie koła: a) Z5B-L, b) Z5B-P, c) Z6B-L, d) Z6B-P na szóstym wózku (napędnym) pojazdu 006 (trójczłon B) zarejestrowane podczas przeglądów P2, w funkcji przebiegu pojazdu



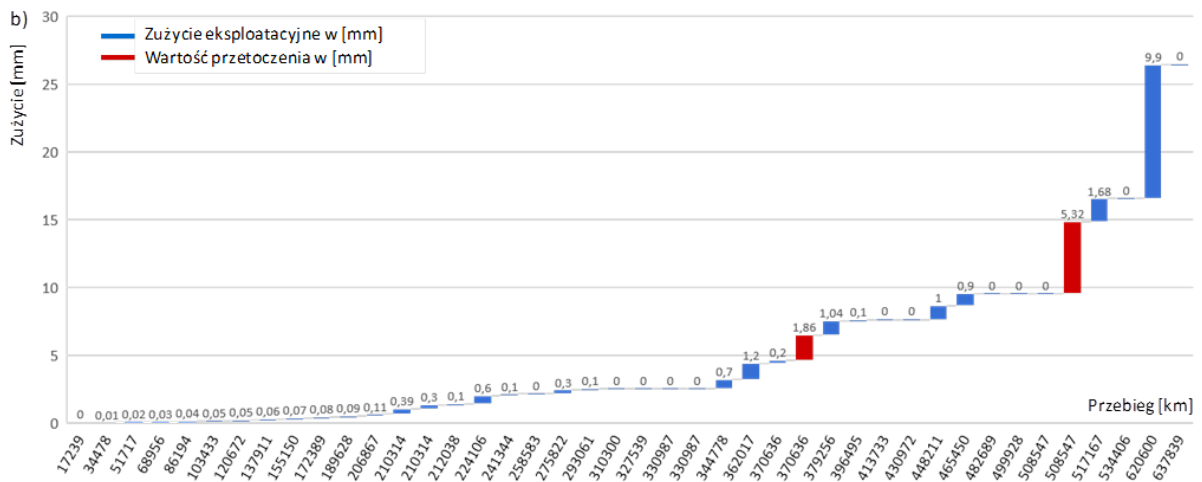
Rys. 4.16. Zużycie kół w drugim wózku (tocznym): a) zestaw ZK3-P, b) zestaw ZK4-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



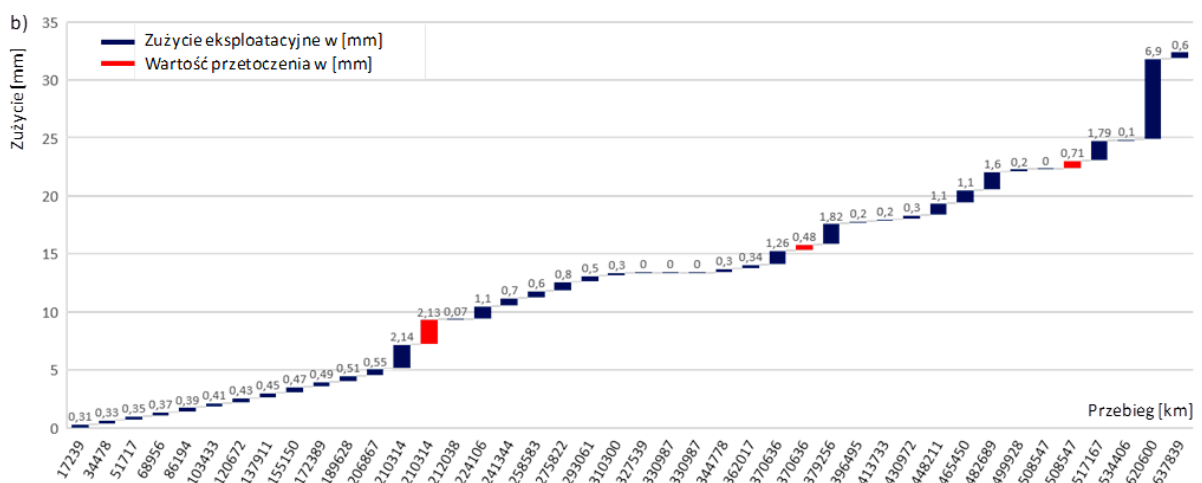
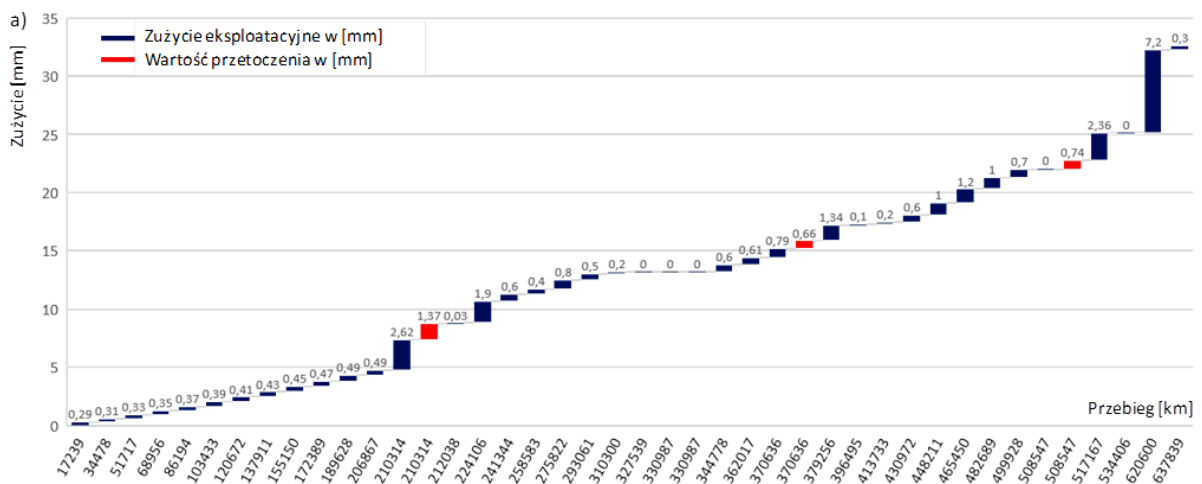
Rys. 4.17. Zużycie kół w trzecim wózku (tocznym): a) zestaw ZK5-P, b) zestaw ZK6-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



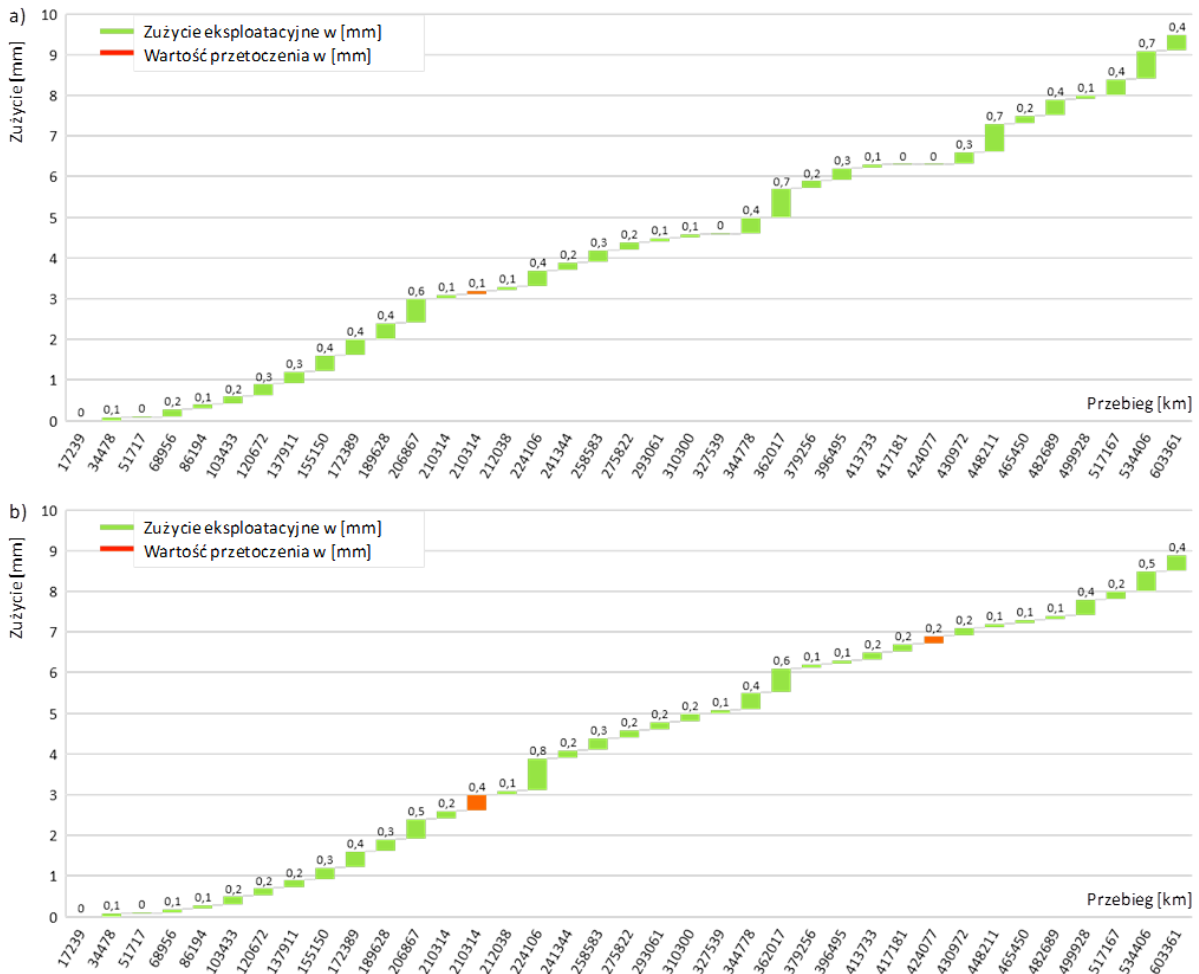
Rys. 4.18. Zużycie kół w czwartym wózku (tocznym): a) zestaw ZK7-P, b) zestaw ZK8-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



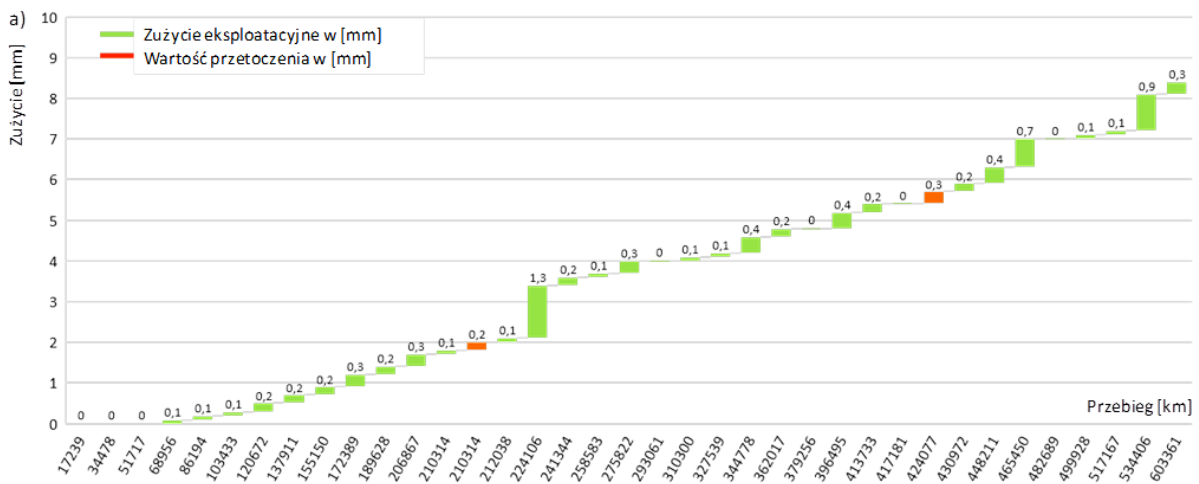
Rys. 4.18. Zużycie kół w czwartym wózku (tocznym): a) zestaw ZK7-P, b) zestaw ZK8-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



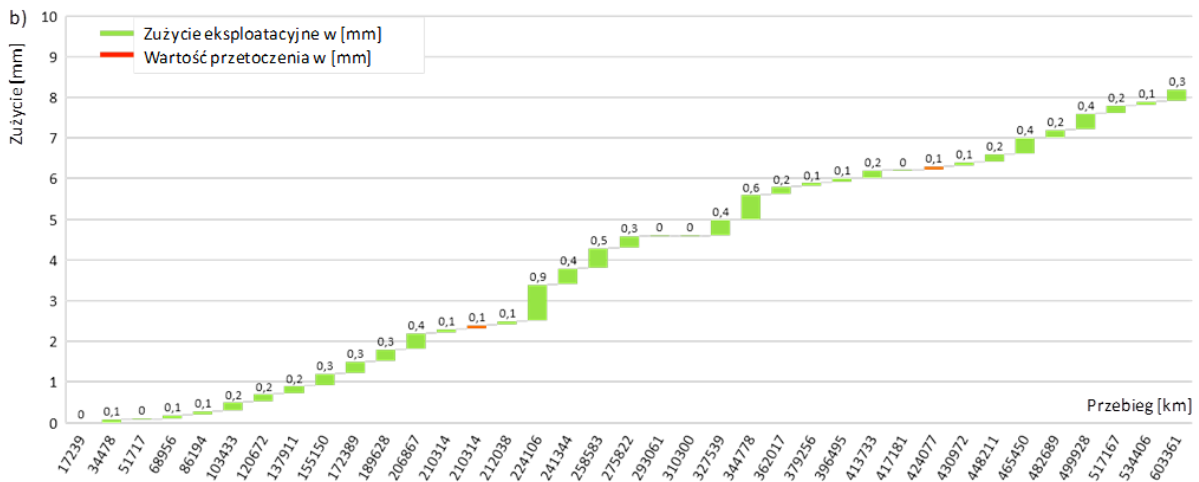
Rys. 4.19. Zużycie kół w piątym wózku (napędowym): a) zestaw ZK9-P, b) zestaw ZK10-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



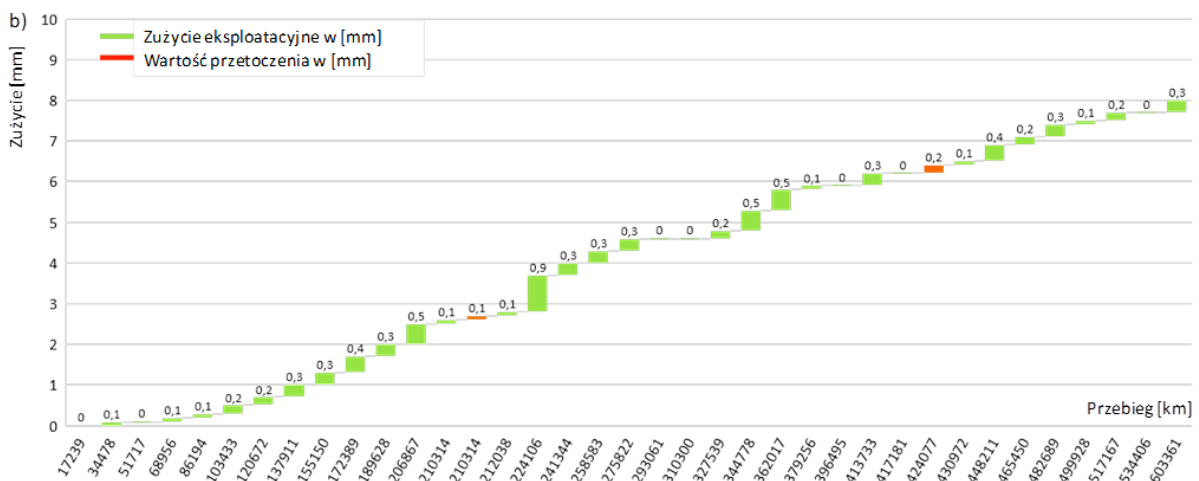
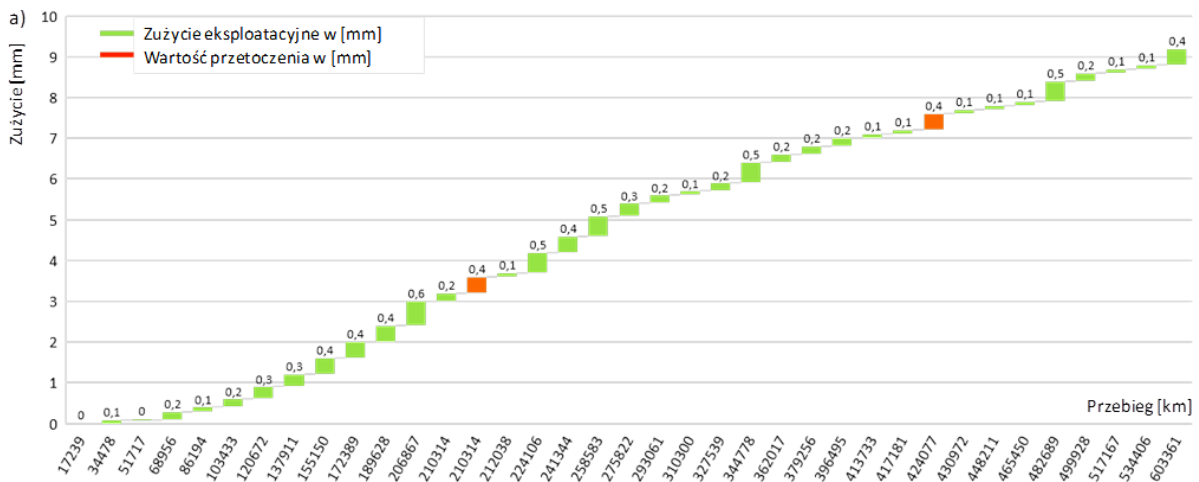
Rys. 4.22. Zużycie tarcz hamulowych w drugim wózku (tocznym): a) zestaw ZK3-P, b) zestaw ZK4-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



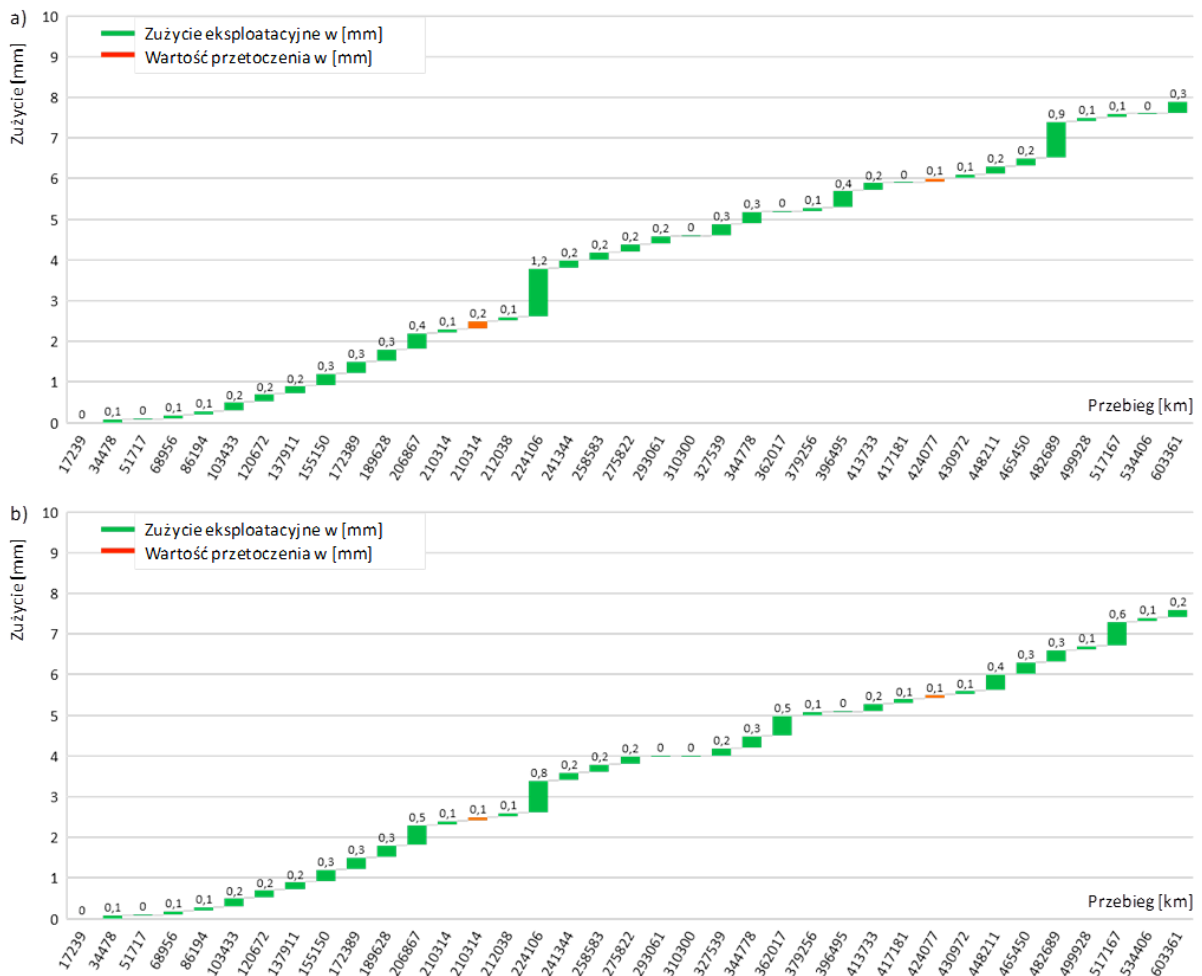
Rys. 4.23. Zużycie tarcz hamulowych w trzecim wózku (tocznym): a) zestaw ZK5-P, b) zestaw ZK6-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



Rys. 4.23. Zużycie tarcz hamulowych w trzecim wózku (tocznym): a) zestaw ZK5-P, b) zestaw ZK6-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



Rys. 4.24. Zużycie tarcz hamulowych w czwartym wózku (tocznym): a) zestaw ZK7-P, b) zestaw ZK8-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu



Rys. 4.25. Zużycie tarcz hamulcowych w piątym wózku (napędowym): a) zestaw ZK9-P, b) zestaw ZK10-P, zarejestrowane podczas przeglądów P2 w funkcji przebiegu pojazdu

ZAŁĄCZNIK B

Procedury programu Matlab do zarządzania zestawami kołowymi

1. Warunek zamiany zestawów kołowych

```
load WynikidlaZK
ii=input('Podaj numer pomiaru ','s');
ii=str2num(ii);
ZN=[WynikidlaZK(1:4,1)-WynikidlaZK(1:4,ii);
WynikidlaZK (17:20,1)-WynikidlaZK (17:20,ii)];
ZT=WynikidlaZK (5:16,1)-WynikidlaZK (5:16,ii);
ZN=ZN/2;
ZT=ZT/2;
ZNmax=max(ZN);
ZTmax=max(ZT);
Dko=input('Podaj średnicę nominalną koła w [mm] ','s');
Dk=str2num(Dko);
Dgra=input('Podaj dolny wymiar graniczny koła w [mm] ','s');
Dgran=str2num(Dgra);
Z_gran=(Dk-Dgran)/2
n_zmiaN=input('podaj liczbę zamian kół napędowych do tej pory ','s');
n_zmianN=str2num(n_zmiaN);
kN=n_zmianN+1;
n_zmiaT=input('podaj liczbę zamian kół tocznych do tej pory ','s');
n_zmianT=str2num(n_zmiaT);
kT=n_zmianT+1;
if ZNmax>=(1/4)*Z_gran*kN
disp('Wykonaj zamianę kół napędowych')
else
disp('Zamiana kół napędowych nie jest potrzebna')
end
if ZTmax>=(1/4)*Z_gran*kT
disp('Wykonaj zamianę kół tocznych')
else
disp('Zamiana kół tocznych nie jest potrzebna')
end
```

2. Warunek zamiany kół zestawów tocznych

```
clear all
load WynikidlaZK
ii=input('podaj numer pomiaru ','s');
ii=str2num(ii);
ZN1=NaN(4,1);
ZN2=NaN(4,1);
ZT=WynikidlaZK (5:16,1)-WynikidlaZK (5:16,ii);
A0 = [ZN1; ZT; ZN2];
B=NaN(20,1);

A=A0;
k=sum(A(~isnan(A)));
while k~=0
[c,imax]=max(A);
[c,imin]=min(A);
B(imin)=imax;
A(imin)=NaN;
B(imax)=imin;
A(imax)=NaN;
k=sum(A(~isnan(A)));
end
P=[1:20]; P=P';
clc
Wynik_toczne=[P(5:16) B(5:16)]
```

3. Warunek zamiany zestawów kołowych tocznych

```
clear all
load WynikidlaZK
ii=input('podaj numer pomiaru ','s');
ii=str2num(ii);
ZN1=NaN(2,1);
ZN2=NaN(2,1);
ZT=WynikidlaZK (5:16,1)-WynikidlaZK (5:16,ii);
```

```
ZT1=[((ZT(1)+ZT(2))/2)
      ((ZT(3)+ZT(4))/2)
      ((ZT(5)+ZT(6))/2)
      ((ZT(7)+ZT(8))/2)
      ((ZT(9)+ZT(10))/2)
      ((ZT(11)+ZT(12))/2)]
```

```
A0 = [ZN1; ZT1; ZN2];
B=NaN(10,1);
A=A0;
k=sum(A(~isnan(A)));
while k~=0
[c,imax]=max(A);
[c,imin]=min(A);
B(imin)=imax;
A(imin)=NaN;
B(imax)=imin;
A(imax)=NaN;
k=sum(A(~isnan(A)));
end
P=[1:10]; P=P';
clc
Wynik_toczne=[P(3:8) B(3:8)]
```

4. Warunek zamiany kół zestawów napędnych

```
clear
load WynikidlaZK
ii=input('podaj numer pomiaru ','s');
ii=str2num(ii);
ZN1=WynikidlaZK (1:4,1)-WynikidlaZK (1:4,ii);
ZN2=WynikidlaZK (17:20,1)-WynikidlaZK (17:20,ii);

ZT=NaN(12,1);
```



```

B=NaN(20,1);
A0 = [ZN1; ZT; ZN2];
A=A0;
k=sum(A(~isnan(A)));
while k~=0
[c,imax]=max(A);
[c,imin]=min(A);
B(imin)=imax;
A(imin)=NaN;
B(imax)=imin;
A(imax)=NaN;
k=sum(A(~isnan(A)));
end
P=1:20; P=P';
clc
Wynik_napedne=[P(1:4) B(1:4)
                P(17:20) B(17:20)]

```

5. Warunek zamiany zestawów kołowych napędnych

```

clear all
load WynikidlaZK
ii=input('podaj numer pomiaru ','s');
ii=str2num(ii);
ZN1=WynikidlaZK (1:4,1)-WynikidlaZK (1:4,ii);
ZN2=WynikidlaZK (17:20,1)-WynikidlaZK (17:20,ii);
ZN11=[((ZN1(1)+ZN1(2))/2)
      ((ZN1(3)+ZN1(4))/2)]
ZN22=[((ZN2(1)+ZN2(2))/2)
      ((ZN2(3)+ZN2(4))/2)]

```

```

ZT=NaN(6,1);
B=NaN(10,1);
A0 = [ZN11; ZT; ZN22];
A=A0;
k=sum(A(~isnan(A)));
while k~=0
[c,imax]=max(A);
[c,imin]=min(A);
B(imin)=imax;
A(imin)=NaN;
B(imax)=imin;
A(imax)=NaN;
k=sum(A(~isnan(A)));
end
P=[1:20]; P=P';
clc
Wynik_napedne_osiami=[P(1:2) B(1:2)
P(9:10) B(9:10)]

```