

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Marek Sokołowski

**Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego
przy zastosowaniu predykcyjnego
systemu utrzymania taboru kolejowego**

Promotor

prof. dr hab. inż. Marianna Jacyna

WARSZAWA 2024

STRESZCZENIE

Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego przy zastosowaniu predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego

Rozprawa doktorska dotyczy problematyki utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem nowoczesnych narzędzi elektronicznych i informatycznych w celu wdrożenia predykcyjnego systemu utrzymania pojazdów kolejowych. Nowoczesne narzędzia dostępne we współczesnej technice pozwalają praktycznie on-line zbierać, agregować i analizować dane z pojazdu generując informacje o stanie pojazdu w każdej chwili jego eksploatacji. Umożliwia to na zastosowanie dla określonych elementów pojazdu kolejowego rozwiązań predykcyjnego systemu utrzymania w miejsce dotychczas powszechnie stosowanego i prawnie ugruntowanego systemu planowo zapobiegawczego.

Przeprowadzona w rozprawie krytyczna analiza literatury wskazuje, że stacjonarne systemy planowo zapobiegawcze utrzymania są spotykane zarówno w utrzymaniu infrastruktury jak też taboru. Brak jest natomiast systemów mobilnych tego typu, które obejmowałyby zagadnienie całościowo. Pierwsze prace naukowe obejmujące ten obszar powstały w ostatnich latach i są nowatorskimi elementami w tej dziedzinie. Modyfikacja, zaproponowana w rozprawie, w porównaniu z powszechnie używanymi systemami polega na wdrożeniu systemu parametrycznego dla kluczowych dla bezpieczeństwa eksploatacji elementów pojazdu. Praktyczna realizacja takiego systemu utrzymania do chwili obecnej nie występuje choć są już wdrożone częściowe rozwiązania.

Jako cel rozprawy wskazano opracowanie systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem technologii elektronicznych i informatycznych oraz transmisji danych on-line na potrzeby oceny technicznej istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji części elementów pojazdów użytkowanych przez metro. Zakłada się, że opracowana metoda systemu utrzymania będzie mogła być wykorzystywana we wszystkich pojazdach kolejowych, co będzie korzystne wielowymiarowo, zarówno w obszarze bezpieczeństwa eksploatacji jak też w obszarze ekonomicznym.

Rozprawa podzielona została na 10 rozdziałów zawierających rozważania teoretyczne, opracowanie metody oraz praktyczne jej zastosowanie. W części teoretycznej, rozdziały 1-6, przedstawiono przesłanki podjęcia tematyki rozprawy, przeprowadzono analizę aktów normatywnych oraz badań realizowanych przez krajowe i zagraniczne ośrodki naukowe w zakresie systemów utrzymania taboru szynowego, co pozwoliło na wskazanie luki badawczej w tym obszarze. Przedstawiono problem badawczy rozprawy, tezę oraz cel główny i cele cząstkowe rozprawy. Usystematyzowano zagadnienia w zakresie wiedzy dotyczącej współcześnie dostępnych narzędzi elektronicznych i informatycznych użytecznych z punktu widzenia ich zastosowania w proponowanym systemie utrzymania. Wskazano na zasady budowy modeli bazujących na predykcji i opisano wymagania funkcjonalne budowy systemu utrzymania taboru kolejowego opartego na modelu predykcyjnym. Zaproponowano model predykcyjny, podano warunki jego działania.

Część utylitarna rozprawy to rozdziały 7-9. W tej części przedstawiono opis procedury metody opracowanego systemu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego. Zaprezentowano graficznie i opisano algorytmy działania poszczególnych procesów, dokonano weryfikacji całego systemu oraz przetestowano poprawność działania jego elementów przez sprawdzenie przypadków użycia. Na danych rzeczywistych w zakresie działań naprawczo-obserwacyjnych w taborze metra warszawskiego dokonano analizy poprawy procesu utrzymania z wykorzystaniem proponowanego w rozprawie podejścia.

Rozdział 10 to Podsumowanie i wnioski wynikające z przeprowadzonych w rozprawie badań. Wskazano na możliwości wykorzystania praktycznego, opracowanego w ramach badań w rozprawie, systemu predykcyjnego utrzymania taboru warszawskiego metra. Przedstawiono również kierunki dalszych badań, w tym obszarze, w zakresie zwiększenia ilości elementów pojazdu, które mogłyby podlegać systemowi predykcyjnego utrzymania.

Słowa kluczowe:

Tabor metra, metody utrzymania, metoda predykcji, narzędzie elektroniczne i informatyczne.

SUMMARY

Method for maintaining the Warsaw Metro rolling stock using a predictive railway rolling stock maintenance system

The doctoral dissertation concerns the issue of maintaining metro rail vehicles using modern electronic and IT tools in order to implement a predictive maintenance system for railway vehicles. The modern tools available in contemporary technology allow for the collection, aggregation, and analysis of vehicle data practically in real time, generating information about the vehicle's condition at any moment of its operation. This makes it possible to apply predictive maintenance solutions for specific components of the railway vehicle instead of the currently widely used and legally established scheduled preventive system.

The critical analysis of the literature conducted in the dissertation indicates that stationary scheduled preventive maintenance systems are found both in infrastructure and rolling stock maintenance. However, there is a lack of mobile systems of this type that would cover the issue comprehensively. The first scientific works covering this area were developed in recent years and constitute innovative elements in this field. The modification proposed in the dissertation, compared to commonly used systems, involves implementing a parametric system for components that are critical for operational safety. A practical implementation of such a maintenance system does not exist yet, although partial solutions have already been introduced.

The objective of the dissertation is defined as the development of a metro rail vehicle maintenance system using electronic and IT technologies and online data transmission for the technical assessment of parts that are significant for operational safety in vehicles used by the metro. It is assumed that the maintenance method developed can be used for all rail vehicles, which would be beneficial on multiple levels—both in terms of operational safety and economic aspects.

The dissertation is divided into 10 chapters containing theoretical considerations, the development of the method, and its practical application. The theoretical part, in Chapters 1–6, presents the rationale for choosing the topic, includes an analysis of normative acts, and reviews research conducted by national and international scientific centers on rolling stock maintenance systems, which allowed identifying a research gap in this field. The research problem, thesis, as well as the main and partial objectives of the dissertation are presented. The issues are systematized regarding the currently available electronic and IT tools that are useful from the perspective of their application in the proposed maintenance system. The principles of building prediction-based models are outlined, and the functional requirements for building a rolling stock maintenance system based on a predictive model are described. A predictive model is proposed, and the conditions for its operation are provided.

The utilitarian part of the dissertation, found in Chapters 7–9, describes the methodology and procedure for the developed predictive maintenance system for rolling stock. The operational algorithms for each process are presented graphically and described; the entire system is verified, and the correctness of its elements is tested by examining use cases. Using real data on repair and service activities in the Warsaw Metro rolling stock, an analysis is carried out to show how the maintenance process can be improved by the approach proposed in the dissertation.

Chapter 10 contains the summary and conclusions stemming from the research conducted in the dissertation. It highlights the possibilities for practical application of the predictive maintenance system developed for the Warsaw Metro rolling stock. Future research directions are also presented, including increasing the number of vehicle components that could be subject to predictive maintenance.

Keywords:

Metro rolling stock, maintenance methods, prediction method, electronic and information tool, technological processes,

Spis treści

WPROWADZENIE	9
1. IDENTYFIKACJA OBSZARU BADAWCZEGO – PRZEGLĄD STANU WIEDZY	12
1.1. Omówienie podstawowych pojęć i definicji stosowanych w rozprawie.....	12
1.2. Istota systemu utrzymania taboru kolejowego	15
1.3. Przegląd literatury w omawianym obszarze.....	19
1.4. Regulacje prawne w zakresie utrzymania taboru kolejowego	21
2. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY.....	27
3. NARZĘDZIA WYKORZYSTYWANE W PROPONOWANYM W ROZPRAWIE ROZWIĄZANIU	32
3.1. Elementy elektroniczne i ich znaczenie dla budowy modelu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego	32
3.2. Elementy informatyczne i ich znaczenia dla koncepcji predykcyjnego modelu utrzymania taboru kolejowego	39
3.3. Narzędzia aparatu formalnego wykorzystywane w pracy	41
3.4. Modele symulacyjne i techniki predykcyjne.....	47
4. MODELOWANIE SYMULACYJNE A ZASADY BUDOWY MODELI OPARTYCH NA PREDYKCJI	49
4.1. Istota budowy modeli symulacyjnych.....	49
4.2. Etapy budowy symulacyjnego modelu predykcyjnego.....	52
4.3. Możliwości i wyzwania dla zastosowania sztucznych sieci neuronowych w modelach predykcji	60
5. WYMAGANIA FUNKCJONALNE BUDOWY SYSTEMU UTRZYMANIA TABORU KOLEJOWEGO OPARTEGO NA MODELU PREDYKCYJNYM.....	64
5.1. Uwagi ogólne	64
5.2. Wymagania prawne i organizacyjne systemu utrzymania taboru metra.....	65
5.3. Wykorzystanie metody predykcyjnej w utrzymaniu taboru.....	67
5.4. Analiza danych z sensorów zabudowanych na pojazdach	69
5.5. Ograniczenia systemu predykcyjnego utrzymania taboru.....	72
6. MODEL PREDYKCYJNY UTRZYMANIA TABORU KOLEJOWEGO	76
6.1. Założenia ogólne modelu	76
6.2. Proces doboru podzespołów pojazdu i ich parametrów i zakresów	79
6.3. Proces przesyłania i analizy danych w centrum operacyjnym	87
6.4. Opis formalny modelu systemu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego	95
7. PROCEDURA METODY SYSTEMU PREDYKCYJNEGO – ALGORYTM ORAZ MOŻLIWOŚCI IMPLEMENTACJI	103
7.1. Ogólny schemat procesu decyzyjnego	103
7.2. Algorytm postępowania	104
7.3. Planowanie utrzymania wspomaganego systemem predykcyjnym - przebieg procesu decyzyjnego	114
7.4. Wstępna ocena systemu predykcyjnego zalety i ograniczenia w modelu.....	116

8. WERYFIKACJA I OCENA MODELU – CASE STUDY	118
8.1. Ustalenie obiektu i danych technicznych pojazdu	118
8.2. Identyfikacja na danych rzeczywistych obiektu – prezentacja danych.....	120
8.3. Analiza przypadków dla danych rzeczywistych	126
8.3.1. <i>Analiza systemu zdefiniowanego w rozdziale 6 – sygnał drgań</i>	<i>127</i>
8.3.2. <i>Analiza systemu zdefiniowanego w rozdziale 6 – sygnał temperatury</i>	<i>127</i>
8.4. Analiza i ocena uzyskanych rezultatów	128
9. WYMOGI IMPLEMENTACJI SYSTEMU W METRZE WARSZAWSKIM.....	131
9.1. Uwarunkowania i wymagania procesu implementacji systemu w metrze.....	131
9.2. Możliwy plan wdrożenia	133
9.3. Ocena wpływu na eksploatację	134
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	135
10.1. Wnioski ogólne	135
10.2. Kierunki dalszych badań	137
BIBLIOGRAFIA	138
SPIS RYSUNKÓW	143
SPIS TABEL	146

Wprowadzenie

Zasadnicze zadanie związane z prawidłowym funkcjonowaniem taboru kolejowego, to jego utrzymywanie w ramach procesu określonego przez Dokumentację Systemu Utrzymania (DSU). Produkowane współcześnie pojazdy szynowe budowane są z elementów, w produkcji przemysłowej, w których wykorzystuje się najnowsze rozwiązania technologiczne. Wydłuża to znacznie ich żywotność oraz sprawność w trakcie normalnej eksploatacji. Współczesny proces utrzymania pojazdów szynowych bazuje głównie na czynnościach kontrolnych, tak aby zapewnić bezpieczny proces eksploatacji pojazdów. Ponadto, po określonym przez producenta czasie, część elementów wymienia się obligatoryjnie bez weryfikowania ich stanu. Takiego typu działanie jest prawidłowe, ponieważ jednym z najważniejszych zagadnień eksploatacyjnych jest zapewnienie bezpieczeństwa zarówno na poziomie operacyjnym jak i strategicznym.

W celu zapewnienia niezawodności, bezpieczeństwa oraz najwyższej jakości usług, konieczny jest efektywny i zgodny z normami system utrzymania taboru kolejowego. Stąd rozprawa doktorska ma na celu opracowanie predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego dla metra warszawskiego, który zapewni niezawodną i bezpieczną organizację ruchu oraz bezpieczeństwo pasażerów przy jednoczesnej minimalizacji kosztów utrzymania pojazdów.

System utrzymania taboru kolejowego (w tym taboru metra) ma na celu nie tylko zapewnienie wysokiego poziomu niezawodności, bezpieczeństwa i jakości usług realizowanych przez warszawskie metro, ale również powinien być dostosowywany do zmieniających się norm i dyrektyw, zarówno na poziomie krajowym, jak i europejskim. Dlatego ważnym elementem celu rozprawy jest opracowanie systemu utrzymania taboru metra warszawskiego jako praktycznego narzędzia, które zapewni bezpieczeństwo i stabilność operacyjną oraz zgodność z obowiązującymi przepisami.

Utrzymanie pojazdów szynowych w Unii Europejskiej regulują różne akty normatywne. Podstawowym rozporządzeniem regulującym utrzymanie pojazdów szynowych jest dyrektywa 2008/110/WE [26] zmieniająca dyrektywę 2004/49/WE w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych. Ustanawia ona wspólne zasady utrzymania pojazdów szynowych i ma na celu zapewnienie wysokich standardów bezpieczeństwa.

Przedmiotowa Dyrektywa ma zastosowanie do wszystkich pojazdów szynowych używanych w europejskiej sieci kolejowej, w tym lokomotyw, wagonów pasażerskich i wagonów towarowych. Określa wymagania dotyczące procedur konserwacji, kompetencji

personelu i ustanowienia zaplecza konserwacyjnego. Dyrektywa nakazuje regularne kontrole i czynności konserwacyjne w celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji pojazdów szynowych. Ustanawia również system certyfikacji dostawców usług utrzymania ruchu, zapewniając ich zgodność z ustalonymi standardami. Agencja Kolejowa Unii Europejskiej (ERA) odgrywa kluczową rolę w nadzorowaniu i egzekwowaniu wdrażania dyrektywy. Państwa członkowskie są odpowiedzialne za transpozycję dyrektywy do prawa krajowego i zapewnienie jej właściwego egzekwowania. Zgodność z wymaganiami dotyczącymi utrzymania jest niezbędna do uzyskania i utrzymania zezwolenia pojazdu na eksploatację w europejskiej sieci kolejowej.

Klasyczna metoda utrzymania pojazdów kolejowych metra zakłada pięć poziomów utrzymania, z których pierwsze trzy to poziomy przeglądowe, a dwa ostatnie to poziomy naprawcze. Bazuje ona na odtwarzaniu zdolności eksploatacyjnych pojazdu w procesie utrzymania. Jakość wykonania istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji elementów i doświadczenia eksploatacyjne potwierdzają bardzo dobry stan tych elementów na kolejnych poziomach utrzymania.

Dostępne elektroniczno-informatyczne metody pomiaru, przesyłania, agregacji i analizy „on-line”, pozwalają na zmianę klasycznego sposobu eksploatacji pojazdów na system predykcyjny. Dlatego też autor rozprawy podjął działania mające na celu opracowanie takiego systemu utrzymania taboru kolejowego.

Niemniej jednak model postulowany wymaga wykorzystania szeregu nowoczesnych technologii oraz uzgodnienia go w ramach wymagań prawnych i formalnych określonych dla utrzymania pojazdów kolejowych.

W niniejszej rozprawie pt. *„Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego przy zastosowaniu predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego”*, przeprowadzono badania wpisujące się w opisaną powyżej problematykę szeroko rozumianego systemu transportu kolejowego, uwzględniając aktualne potrzeby i trendy oraz możliwości jakie stwarza współczesny rozwój narzędzi elektronicznych i informatycznych. Skonstruowanie i wdrożenie takiego systemu ma zarówno techniczne jak też ekonomiczne uzasadnienie.

Stąd główny cel badań niniejszej rozprawy sformułowano jako **opracowanie predykcyjnego systemu utrzymania pojazdów**, który pozwoli zwiększyć efektywność stosowania dostępnych rozwiązań. W związku z tym, sformułowano również tezę rozprawy (patrz rozdział 2 rozwinięcie tezy), która brzmi:

Stosowanie narzędzi elektronicznych i informatycznych oraz transmisji on-line umożliwi opracowanie efektywnego predykcyjnego systemu utrzymania taboru

kolejowego, który zwiększa bezpieczeństwo i efektywność eksploatacji pojazdów i pośrednio zmniejsza koszty utrzymania.

Efektem użytecznym rozprawy jest metoda predykcyjnego utrzymania pojazdów metra wykorzystująca rozwiązania elektroniczno-informatyczne do automatycznego zbierania danych o stanie ważnych dla bezpieczeństwa elementów pojazdu, przesyłanie ich z pojazdu do centrum dyspozytorskiego, agregację, analizę i sformułowanie oceny przedstawionej w stosownym raporcie.

Rozprawa podzielona została na 9 rozdziałów. Graficznie jest to zaprezentowane na Rys. 2.1.

W rozdziale 1 przedstawiono identyfikację obszaru, którego dotyczy rozprawa, dokonano przeglądu literatury naukowej w tym zakresie, przedstawiono tło prawne systemu utrzymania pojazdów.

Rozdział 2 to podsumowanie przesłanek do prowadzenia badań omówienie celu pracy, jej zakresu oraz głównej tezy, która została udowodniona w dalszej części rozprawy. Natomiast rozdział 3 dysertacji ma na celu usystematyzowanie wiedzy dotyczącej współcześnie dostępnych narzędzi elektronicznych i informatycznych użytecznych z punktu widzenia ich zastosowania w proponowanym systemie utrzymania. Ponadto, w rozdziale 3 przedstawiono elementy aparatu formalnego używanego w proponowanym systemie.

W rozdziale 4 z uwzględnieniem usystematyzowanej wiedzy i aktualnego stanu badań zdefiniowano ogólne wymagania i zasady budowy modeli predykcyjnych opartych na symulacji procesu rzeczywistego. Natomiast w rozdziale 5 przedstawiono wymagania funkcjonalne budowy systemu i utrzymania taboru kolejowego w procesie opartym na predykcji i wykorzystującym dostępne dane z sensorów zamontowanych na pojeździe oraz wykorzystujący narzędzia analizy danych do oceny stanu elementów pojazdu.

W rozdziale 6 przedstawiono konkretny model predykcyjny utrzymania taboru jego metodę wypracowania oceny przez system predykcyjny, tj. algorytm działania i jego implementację.

W rozdziale 7 przeprowadzono weryfikację modelu i zastosowanie opracowanej metody przy wykorzystaniu rzeczywistych danych pomiarowych zbieranych przez sensory zamontowane na pojazdach metra. W rozdziale 8 przeprowadzono analizę tzw. case study weryfikującą elementy działania modelu predykcyjnego na przykładzie rzeczywistych danych.

Rozdział 9 przedstawia szczegółowo warunki implementacji systemu w metrze warszawskim. Natomiast wnioski oraz kierunki dalszych badań przedstawiono w rozdziale 10. Omówiono w nim zrealizowane badania i wskazano na osiągnięcie celów dysertacji i udowodnienie tezy. Wskazano również przyszłe prace badawcze oraz perspektywy rozwoju opracowanej metody i możliwości ich zastosowania.

1. Identyfikacja obszaru badawczego – przegląd stanu wiedzy

1.1. Omówienie podstawowych pojęć i definicji stosowanych w rozprawie

Obszar badawczy dotyczący modelu predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego obejmuje zagadnienia związane z cyklem i poziomami utrzymania, w szczególności z procedurami i technologiami systemu planowo zapobiegawczego. Celem rozprawy jest opracowanie modelu predykcyjnego, który będzie stanowił narzędzie wspomaganie decyzji dla efektywnego systemu utrzymania pojazdów metra warszawskiego. Ma to na celu nie tylko podniesienie bezpieczeństwa realizacji usług przewozowych, ale również efektywne wykorzystanie taboru poprzez zastosowanie odpowiednich narzędzi i metod decyzyjnych.

Dla prowadzenia badań w rozprawie niezbędne jest wyjaśnienie pewnych pojęć związanych z utrzymaniem taboru kolejowego takich jak m.in.: poziom utrzymania, cykl utrzymania, pojazd metra, system parametryczny, system planowo-zapobiegawczy czy stan zdatności.

Utrzymanie taboru kolejowego, a konkretnie pojazdów szynowych w Unii Europejskiej regulowane są przez różne akty normatywne. Zasadniczo należy wspomnieć dyrektywę 2014/45/UE [18], która reguluje utrzymanie pojazdów szynowych oraz jej uzupełnienie tj. Dyrektywa 2008/110/WE zmieniająca dyrektywę 2004/49/WE w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych [19]. Wymieniona dyrektywa wraz z uzupełnieniem wskazuje na wspólne zasady utrzymania pojazdów szynowych celem zapewnienie jak najwyższych standardów bezpieczeństwa. Stosuje się ją do wszystkich pojazdów szynowych, które są użytkowane w europejskiej sieci kolejowej, tj.: lokomotyw, wagonów pasażerskich i wagonów towarowych. Co ważne wspomniana dyrektywa określa wymagania w zakresie procedur utrzymania, konserwacji, zadań i kompetencji pracowników oraz zakresu prac zaplecza konserwacyjnego. Można powiedzieć, że wskazana dyrektywa nakazuje regularne kontrole i czynności konserwacyjne mające na celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji taboru kolejowego.

Zatem **System Utrzymania** to system czynności, których wykonywanie jest konieczne dla odtworzenia i utrzymania stanu zdatności pojazdu, niezbędnego do prowadzenia bezpiecznej eksploatacji przy użyciu tego pojazdu. Natomiast **Stan Zdadności** to stan techniczny pojazdu pozwalający na bezpieczne prowadzenie eksploatacji przy użyciu tego pojazdu.

Mając na uwadze powyższe można powiedzieć, że **utrzymanie pojazdu** to realizacja czynności technicznych i serwisowych pojazdu określonych przez system utrzymania, w celu utrzymania lub przywrócenia stanu zdadności pojazdu. Dokumentem, który stanowi podstawę

do realizacji utrzymania pojazdów jest częstotliwość przeglądów oraz ich zakres wskazany i zapisany przez producenta taboru w tzw. Dokumentacji Systemu Utrzymania (DSU).

Dokumentacja Systemu Utrzymania (DSU) to dokumentacja konieczna dla realizacji planowych czynności utrzymaniowych ściśle definiujący szczegółowy zakres czynności konserwacyjnych dla każdego podzespołu i elementu pojazdu podzielony na poziomy utrzymania od P1 do P5 [70]. Zgodnie z polskim prawem każdy typ pojazdu zobowiązany jest posiadać Dokumentację Systemu Utrzymania zatwierdzoną przez Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego, a wszystkie czynności utrzymaniowe muszą być wykonywane i rejestrowane ściśle zgodnie z tą dokumentacją. Dokumentacja Systemu Utrzymania definiuje po jakim przebiegu kilometrowym/czasie pojazd wymaga przeprowadzenia przeglądu lub naprawy odpowiedniego poziomu P1-P5.

Nie ulega wątpliwości, że system utrzymania taboru kolejowego ustalany jest na podstawie szeregu czynników, które mają wpływ na częstotliwość przeglądów użytkowanego taboru. Dlatego przyjęcie odpowiedniego harmonogramu przeglądów ma bardzo ważne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa, niezawodności czy efektywności eksploatowanego taboru kolejowego. Odpowiedni harmonogram przeglądów tj. ustalenie przeprowadzenia przeglądu lub naprawy odpowiedniego poziomu P1-P5, ma również wpływ na dostępność taboru oraz na koszty utrzymania.

Poziomy Utrzymania – poziomy utrzymania są to zdefiniowane elementy systemu utrzymania zawierające zakres czynności niezbędny dla danego etapu utrzymania pojazdu, zdefiniowane w Rozporządzeniu z 12 października 2005 r. [70]. Rozporządzenie dzieli poziomy utrzymania na zakresy od P1 do P5, przy czym poziomy od P1 do P3 określane są przeglądami, a poziomy P4 (często dzielony na podpoziomy) i P5 nazywane są naprawami. Każdy pojazd kolejowy posiada DSU, które ściśle definiuje po jakim przebiegu kilometrowym/czasie pojazd wymaga przeprowadzenia przeglądu lub naprawy odpowiedniego poziomu. Wiąże się to z cyklem utrzymania.

Cykl utrzymania to pełny cykl przeglądowo-naprawczy będący elementem Dokumentacji Systemu Utrzymania wszystkich kolejnych, następujących po sobie w zdefiniowany sposób, przeglądów i napraw od P1 do P5 dla danego typu pojazdu kolejowego [30]. Ze względu na fakt, że badania prowadzone w rozprawie dotyczą utrzymania taboru metra warszawskiego, to dla jednoznaczności dalszych badań niezbędne jest zdefiniowanie pojazdu metra.

Pojazd metra to pojazd kolejowy przeznaczony do realizowania przewozów kolejowych na liniach kolei podziemnej, który musi spełniać specyficzne wymagania techniczne pozwalające na

prowadzenie ruchu kolejowego przy specyficznych ograniczeniach związanych z koleją podziemną.

Kolejnym aspektem, który jest istotny z punktu widzenia prowadzonych badań to system predykcyjny czy system parametryczny. Jak wskazano na częstotliwość przeglądów użytkowanego taboru kolejowego, a tym samym na system jego utrzymania ma wpływ wiele czynników. Dlatego ważna jest wieloaspektowa ocena na podstawie kluczowych parametrów podzespołów pojazdu. Do rejestracji parametrów pojazdu służą montowane specjalne sensory.

Sensory to czujniki rejestrujące wszystkie parametry techniczne pojazdu konieczne dla oceny stanu podzespołów pojazdu. Natomiast **System Parametryczny** (zdefiniowany w niniejszej pracy) to system utrzymania, generujący zakres czynności serwisowych pojazdu na podstawie oceny stanu pojazdu i jego podsystemów, ustalonej na podstawie parametrów pojazdu rejestrowanych przez dostępne sensory. Ocena taka jest generowana na podstawie analizy kluczowych parametrów podzespołów pojazdu. Specjalnie dobrane parametry są rejestrowane przez system sensoryczny pojazdu, następnie są rejestrowane przesyłane do centralnego komputera, gdzie są analizowane przez system oceniający i generujący ocenę oraz plan koniecznych czynności. Jego podsystemem jest system predykcyjny

System Predykcyjny – system wypracowujący ocenę stanu pojazdu oraz przewidujący pozostały czas bezpiecznej eksploatacji na podstawie analizy parametrów pojazdu i jego podzespołów rejestrowanych na pojeździe przez system parametryczny. Stanowi on podsystem systemu parametrycznego, który jest konieczny dla wygenerowania zakresu koniecznych czynności utrzymaniowych. W tym kontekście warto wyjaśnić krótko termin predykcji. Zasadniczo predykcja (patrz [75]), to proces wnioskowania o przyszłych wielkościach zmiennych losowych w określonym przyszłym momencie (okresie), gdy nie jest znana wielkość wyjściowa. Na przykład predykcja ekonometryczna to proces wnioskowania w przyszłość na podstawie modelu ekonometrycznego, gdzie występuje składnik losowy, a który opisuje badany fragment rzeczywistości [76].

W tym kontekście **model predykcyjny** to pewnego rodzaju model decyzyjny (matematyczny), statystyczny wykorzystywany do przewidywania przyszłych wyników na podstawie wcześniejszych danych. Modele predykcyjne stosuje się do oceny przyszłych zdarzeń na podstawie historii różnego typu parametrów i tendencji danego procesu, znanych z przeszłości.

System Planowo-Zapobiegawczy to system utrzymania realizujący zaplanowane czynności utrzymaniowe zgodnie z DSU tj. planowe czynności konserwacyjne w ramach poziomów utrzymania od P1 do P5 bez względu na rzeczywisty stan podzespołów.

Centrum Nadzoru Stanu Pojazdu (CNSP) to miejsce agregacji, analizy i interpretacji danych, których interpretacja służyć będzie do planowania prac utrzymaniowych poszczególnych pojazdów.

1.2. Istota systemu utrzymania taboru kolejowego

Rozprawa doktorska, w ogólnym ujęciu, ma na celu dostarczenie narzędzia wspomaganie decyzji oceny procesu technologicznego utrzymania pojazdów. Według wiedzy autora takie kompleksowe narzędzie obecnie nie istnieje. Brak jest też opracowań badawczych, które by dotyczyły bezpośrednio takiego zagadnienia w pojazdach metra. Powstały natomiast prace badawcze wprowadzające podstawy funkcjonowania takich systemów w działalności eksploatacyjnej kolei [12], [3].

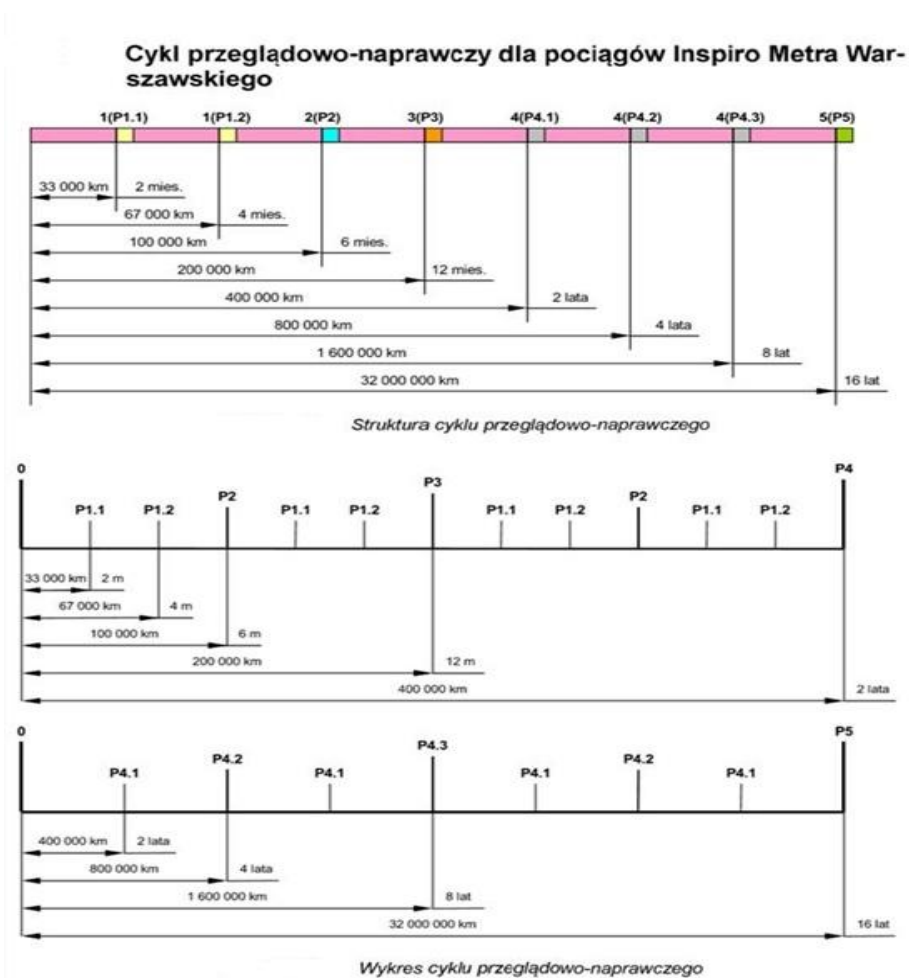
Zagadnienie utrzymania pojazdów kolejowych, w ogólności, liczy sobie co najmniej tyle lat co same pojazdy. Utrzymanie pojazdów w stanie zdatności do użytkowania jest kwestią podstawową. Równie ważną i zasadniczą kwestią jest utrzymanie ich w sposób najbardziej efektywny, tj. przy zachowaniu jak najwyższego poziomu sprawności, bezpieczeństwa ich eksploatacji przy jednoczesnym jak najmniejszym zużyciu sił i środków do tego przeznaczonych. Oznacza to, że system utrzymania pojazdów kolejowych to wieloaspektowy problem decyzyjny, który wymaga wszechstronnej wiedzy i właściwego podejścia do jego zaprojektowania.

Na ogół, sposób prawidłowego utrzymania pojazdów konstruował sam dostawca. Współcześnie dostawca pojazdu wybiera elementy pojazdu (elektryczne, elektroniczne, pneumatyczne, mechaniczne) na globalnym rynku i konstruuje go jako całość, czyli dokonuje integracji wszystkich podzespołów pojazdu. Każdy z elementów danego pojazdu posiada własny cykl przeglądowo-naprawczy. Obowiązkiem producenta pojazdu jest koordynacja tych cykli w jeden spójny cykl pojazdu. Wymaga to głębokiej znajomości współdziałania elementów pojazdu. Ponadto integrator musi znać wszystkie kluczowe parametry elementów pojazdu, aby wygenerowana przez niego gradacja czynności utrzymaniowych była zachowana.

W polskim prawie funkcjonuje takie zestawienie czynności utrzymaniowych w postaci tzw. Dokumentacji Systemu Utrzymania (DSU). Każdy nowy pojazd, w trakcie uzyskiwania świadectwa eksploatacji typu taboru, musi posiadać taką dokumentację przedłożoną Urzędowi Transportu Kolejowego do zatwierdzenia wraz z Dokumentacją Techniczno-Ruchową. Dokumentacja (DSU) zawiera stosowny cykl utrzymaniowy. Polskie prawo wymaga zdefiniowania tzw. poziomów przeglądowych od P1 do P5. Cykl utrzymaniowy oprócz szeregu

czynności obsługowych zawiera w pierwszej kolejności kryteria decydujące o przystąpieniu do czynności utrzymaniowych odpowiedniego poziomu. Kryteria takie opierają się na dwóch parametrach, tj. przejechanej przez pojazd liczbie kilometrów oraz czasie, który upłynął od ostatniego przeglądu. Rys. 1.1 zawiera przykładowy cykl przeglądowo-naprawczy pojazdu typu Inspiro produkcji firmy Siemens opisany graficznie [15]. Opis cyklu przedstawia następujący harmonogram:

- P1 – co 31 000 ± 2 000 km lub co 2 miesiące,
- P2 – co 95 000 ± 5 000 km lub co 6 miesięcy,
- P3 – co 190 000 ± 10 000 km lub co 1 rok,
- P4.1 – co 380 000 ± 20 000 km lub co 2 lata,
- P4.2 – co 760 000 ± 40 000 km lub co 4 lata,
- P4.3 – co 1 520 000 ± 80 000 km lub co 8 lat,
- P5 – co 3 040 000 ± 160 000 km lub co 16 lat.



Rys. 1.1. Cykl przeglądowo naprawczy pojazdów Inspiro produkcji Siemens
źródło: dokumentacja techniczno-ruchowa pojazdów typu Inspiro produkcji Siemens [16]

Na tej podstawie jednostka organizacyjna, która pojazd utrzymuje, przygotowuje technologię przeglądu pojazdu na każdym poziomie utrzymania od P1 do P5. Technologia utrzymaniowa zawiera szczegółowy opis czynności dla danego typu urządzenia oraz zestaw prób sprawdzających lub pomiarów potwierdzających poprawność geometrii i działania podzespołu.

W zależności od poziomu wykonywanych czynności utrzymaniowych określony jest czas ich wykonywania oraz głębokość demontażu urządzeń do wymiany całych podzespołów włącznie. Wyższe poziomy czynności utrzymaniowych zazwyczaj wymagają demontażu wózków i zestawów kołowych, a także szeregu czynności utrzymaniowych na wszystkich praktycznie elementach pojazdu. Tak duży zakres czynności wymaga długiego czasu wyłączenia pojazdu z eksploatacji.

W nowoczesnych pojazdach od poziomu P3, czas wymagany na wykonanie czynności utrzymaniowych wynosi od 1 miesiąca nawet do pół roku dla poziomu P5, w zależności od logistyki procesu. Każdy przegląd wyższego poziomu kończy się protokołarnie opisaną jazdą próbną, na której wykonywane są stosowne próby sprawdzające zarówno sprawność poszczególnych podzespołów, jak też prawidłowość ich współdziałania np. przez realizację złożonych funkcji sterowania pojazdem.

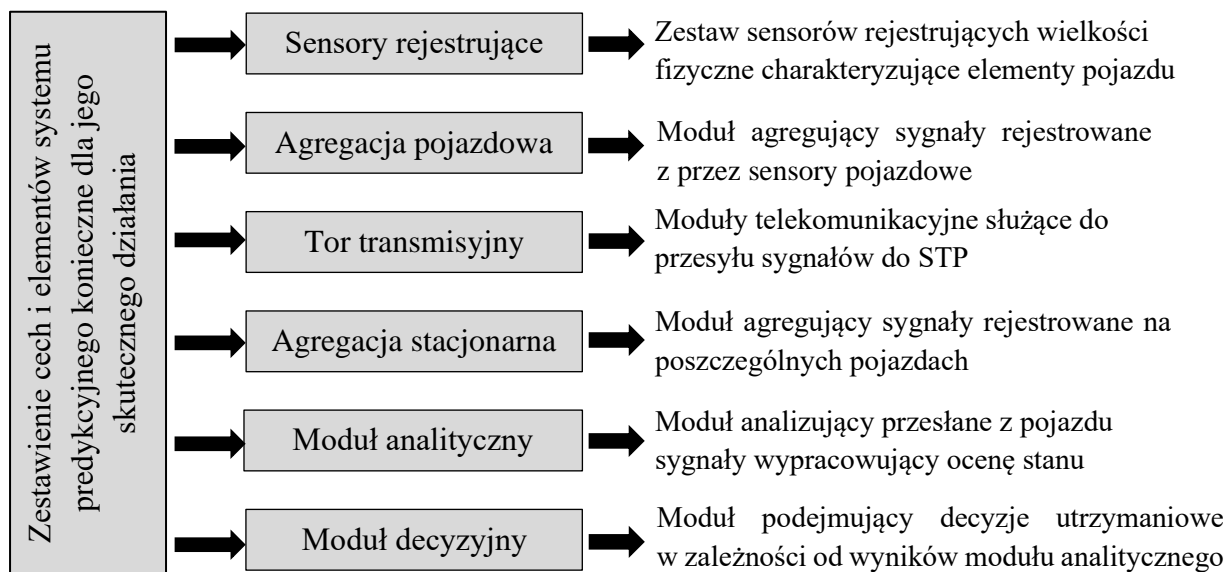
Realizacja całego procesu utrzymaniowego wymaga dobrze zaplanowanej logistyki wszystkich czynności, uwzględniając także proces wysyłki części podzespołów do ich producentów, dla wykonania stosownych czynności utrzymaniowych. Ponadto, niezbędne są stosunkowo duże przestrzenie robocze, bogate wyposażenie oraz duży zespół wszechstronnie wykwalifikowanych pracowników. Niesie to ze sobą znaczne obciążenia dla podmiotu prowadzącego utrzymanie.

Niniejsza rozprawa doktorska ma na celu, zmianę powyżej opisanego paradygmatu utrzymania przez wprowadzenie diagnostyki on-line, pozwalającej oceniać stan kluczowych urządzeń w trakcie eksploatacji, co z kolei pozwoli na dynamiczne przesuwanie określonych czynności w czasie. Należy jednocześnie podkreślić, że będzie to taki sposób monitorowania on-line parametrów ważnych dla bezpieczeństwa eksploatacji, aby można było zrezygnować z niektórych czynności utrzymaniowych jako nie zasadnych w świetle stałej i pewnej wiedzy o stanie danego podzespołu.

Dotychczasowe prace naukowe z zakresu utrzymania czy diagnostyki nie opisywały całościowo procesu zmiany opisywanego paradygmatu. Pierwsze prace dotyczące diagnostyki stanu pojazdów on-line skupiały się dotychczas na urządzeniach stacjonarnych. Przykładowo praca [52], opisuje wykorzystanie układu pomiarowego tor-pojazd do wykorzystania

w diagnostyce dla celów dopuszczeniowych. Podobnie praca [2] z 2014 roku opisuje różne systemy diagnostyczne, które wykorzystują narzędzia planowane przez autora do wykorzystania, przy czym prawie wszystkie (prócz jednego) prezentowane stanowiska są obiektami stacjonarnymi. Niemniej jednak praca [74] z 2010 roku, zasygnalizowana w pracy [2] jest jedynym znanym autorowi praktycznym i wdrożonym systemem firmy SKF, bazującym na logice diagnostyki on-line dla systemu predykcyjnego w utrzymaniu łożysk.

Na schemacie przedstawionym na Rys. 1.2. opisano cechy systemu on-line, które są wymagane dla prawidłowo skonstruowanego systemu predykcyjnego.



Rys. 1.2. Cechy systemu predykcyjnego wymagane dla jego skuteczności

źródło: opracowanie własne

Każdy z modułów przedstawionych na rysunku pełni istotną, ale różniącą się istotnie funkcją w całym modelu predykcyjnym.

Sensory rejestrujące to zestaw sensorów, który stanowi podstawę systemu. Ich zadaniem jest nieprzerwane monitorowanie i przesyłanie sygnałów istotnych parametrów fizycznych, takich jak wibracje, temperatura, prądy czy napięcia elementów pojazdu. Wysoka dokładność i czułość sensorów pozwalają na precyzyjną ocenę wartości każdego parametru i wczesne wykrywanie anomalii oraz zmian w stanie technicznym monitorowanych podzespołów.

Agregacja pojazdowa to moduł w pojeździe służący do scalania danych zbieranych z różnych sensorów w obrębie pojedynczego pojazdu. Dzięki zastosowaniu odpowiednich algorytmów i protokołów, dane pomiarowe są wstępnie filtrowane, normalizowane oraz kompresowane, co umożliwia uzyskanie zunifikowanego, spójnego zestawu informacji o stanie technicznym elementów pojazdu.

Tor transmisyjny to droga transmisji sygnału, która obejmuje zarówno elementy infrastruktury pojazdu jak też rozwiązania odpowiedzialne za niezawodny i efektywny przesył danych z pojazdu do stacjonarnego punktu przetwarzania. Wysokiej jakości łącza, redundancja oraz mechanizmy zabezpieczające przed utratą lub zniekształceniem danych gwarantują, że informacje z pojazdu dotrą do kolejnych modułów w odpowiednim czasie i w nienaruszonym stanie.

Agregacja stacjonarna to moduł rejestracji stacjonarnej, który pełni rolę centralnego punktu konsolidacji danych pochodzących z wielu pojazdów. Dzięki zaawansowanym narzędziom informatycznym, dane są zestawiane, porównywane i ujednolicane w ujęciu pojazdowym. Pozwala to na dalszą ich analizę w module analitycznym.

Moduł analityczny to część analityczna wykorzystująca metody zaawansowanej analizy danych, w tym techniki statystyczne, algorytmy uczenia maszynowego oraz modele oparte na wiedzy inżynierskiej, aby interpretować zintegrowane informacje o stanie pojazdów. Na tej podstawie dokonywana jest ocena ryzyka wystąpienia awarii, prognozowanie pozostałego czasu eksploatacji kluczowych komponentów oraz wypracowywanie wniosków dotyczących optymalnych działań utrzymaniowych.

Moduł decyzyjny to ostatni element łańcucha, który stanowi moduł decyzyjny, którego zadaniem jest sugerowanie obsłudze konkretnych decyzji utrzymaniowych na podstawie wyników analizy danych. Może to obejmować planowanie konserwacji zapobiegawczej, wymianę części w odpowiednim momencie czy korygowanie strategii eksploatacyjnych. Moduł decyzyjny przekłada zgromadzoną wiedzę i analizy na konkretne propozycje działania służące poprawie niezawodności oraz wydajności całego systemu.

1.3. Przegląd literatury w omawianym obszarze

Biorąc pod uwagę cel rozprawy warto podkreślić, że dostępnych jest wiele pozycji literaturowych opisujących utrzymanie planowo-zapobiegawcze [69], [68], które na chwilę obecną jest najbardziej rozpowszechnione. Natomiast sama idea wykorzystania nowoczesnych narzędzi dla poprawy efektywności procesu utrzymania nie jest dotychczas szeroko opisywana. Pierwsze prace [74], [12] pokazujące takie możliwości pojawiły się w ciągu ostatnich kilkunastu lat. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat powstały prace naukowe, które pokazują jak rozwój nowoczesnych rozwiązań technologicznych pozwala na uzyskanie większej efektywności utrzymania urządzeń technicznych [2], [52], [72].

Autor dokonał wyboru istotnych prac, które przybliżają ideę wykorzystującą przedstawiony kierunek rozwoju i poddał je krytycznej analizie. Przedstawiają one opis nowoczesnych rozwiązań z ostatnich kilkunastu lat oraz zakres ich wdrożenia lub potencjalnego wykorzystania. Prace te dają zarys obecnego stanu wiedzy w zakresie „predykcyjnych systemów utrzymania” [3], [12], [72].

Jedną z ważniejszych pozycji w kontekście diagnostyki predykcyjnej to praca [12] z 2017 roku. Autorzy pracy omawiają ewolucję utrzymania przemysłowego, szczególnie w sektorze kolejowym. W swoich analizach podkreślają przejście od utrzymania planowo-zapobiegawczego do modelu predykcyjnego. Omawiają również przyczyny pojawienia się prognozowania i zarządzania stanem pojazdu (Prognostics and Health Management - PHM) w firmach kolejowych. Odmienne podejście do metody planowo-zapobiegawczej przedstawiają autorzy pracy [72]. W pracy tej autorzy proponują metodę prognozowania dla planowania utrzymania kolejowego. Metoda ta nie bazuje na danych o stanie, a na danych o awariach. Skupia się na ocenie nasilenia awarii i przewidywaniu pozostałego czasu użytkowania dla systemów drzwi kolejowych.

Dość ciekawe podejście do prognozowania i zarządzania stanem pojazdów szynowych przedstawiają autorzy w pracy [3]. W tym przypadku, badania koncentrują się na analizie systemów PHM w kontekście wózków pociągów dużych prędkości. Autorzy omawiają kroki wdrożenia, wyzwania i znaczenie PHM dla pojazdów kolejowych i dla całego kolejnictwa.

Inne podejście, z tej problematyki, prezentują autorzy pracy [86] opierając się na liniach lotniczych. Autorzy artykułu w sposób interesujący skupiając się na systemach lotniczych, omawiają techniki i ramy prognozowania i zarządzania stanem, które są istotne dla strategii predykcyjnej konserwacji w złożonych systemach, takich jak utrzymanie taboru kolejowego. Natomiast w artykule [71], omawiane są obecne wyzwania i najnowsze rozwiązania technologiczne zastosowane w systemach predykcyjnych w utrzymaniu i procesie podejmowania decyzji środków transportu. Autorzy, na przykładzie samolotów wojskowych, przedstawiają szerokie spektrum badań i prezentacji wyników z obszaru obronności.

Procedurę podejścia do monitorowania systemów oceny stanu i przewidywania ich awarii przedstawiają autorzy pracy [23]. Autorzy nie skupiają się na samych wynikach badań, ale wskazują bardzo istotne zagadnienia dotyczące procesu pozyskania danych, zasad i metod ich przetwarzania oraz doboru strategii ich konserwacji. W pracy tej, autorzy szczegółowo omawiają kolejne kroki potrzebne do monitorowania systemów oceny stanu i przewidywania ich awarii. W sposób szczególny koncentrują się na technologiach sensorowych, pozyskiwaniu danych, ich przetwarzaniu oraz strategiach predykcyjnej konserwacji.

W artykule [82], autorzy przedstawiają przegląd rozwiązań w zakresie zrównoważonego wytwarzania pojazdów i polityki utrzymania. Dużą wagą, w tym przypadku, skupiona jest na przedstawieniu badań z obszaru prognozowania i zarządzania stanem pojazdu. Autorzy podkreślają, że w systemach utrzymania pojazdów duże znaczenie mają metody przewidywania awarii systemów i aspekty wdrażania proaktywnych strategii konserwacji.

Problematyki proaktywnych strategii konserwacji dotyczy również artykuł [10], w którym autorzy prezentują nową ramową koncepcję dla predykcyjnej konserwacji. W artykule przedstawiono koncepcję nowego podejścia do systemu zarządzania utrzymaniem urządzeń w przemyśle. Koncepcja oparta jest na prognozowaniu wystąpienia sytuacji niepożądanych determinowanych analizą danych uzyskanych częściowo w wyniku nadzoru, a częściowo online. Zawiera studium przypadku na podstawie danych zebranych z testowego stanowiska.

W pracy [52], autorzy przedstawiają wyniki badań nad stacjonarnym systemem monitorowania i diagnozowania stanu pojazdów szynowych. W tym przypadku badane są możliwości adaptacji systemu monitorowania i diagnozowania stanu pojazdów szynowych oraz torów w kontekście badań homologacyjnych, zgodnie z prawem polskim. Badania wykonane zostały na rzeczywistym pojeździe szynowym poruszającym się po infrastrukturze kolejowej. Ponadto omawiane jest zastosowanie parametrów rejestrowanych w kontekście badań homologacyjnych zgodnie z rozporządzeniem. Proponowane są również dalsze możliwości wykorzystania badań w tym zakresie.

Natomiast w pracy [2], autorzy skupili swoją uwagę na problematyce diagnostyki technicznej pojazdów szynowych, zwłaszcza tych nowo budowanych i modernizowanych. W artykule zostały omówione stosowane metody diagnostyczne oraz wyzwania, które stoją przed inżynierami i technikami zajmującymi się eksploatacją i utrzymaniem taboru kolejowego. Podobnie autorzy pracy [74] skupiają swoją uwagę na zagadnieniach diagnostyki kolejowej. Przedstawione zostały informacje dotyczące ważnych aspektów diagnostyki kolejowej, takich jak: badanie osi, łożysk, zestawów kołowych. Należy podkreślić, że jest to system mobilny, zamontowany na pojeździe, który poprzez sensory monitoruje stan niektórych elementów, podsystemów i ich funkcje.

1.4. Regulacje prawne w zakresie utrzymania taboru kolejowego

Właściwie zaprojektowany i prawidłowo realizowany proces utrzymania pojazdów kolejowych stanowi jeden z kluczowych czynników warunkujących bezpieczeństwo

funkcjonowania pojazdu kolejowego. Na poziomie europejskim kwestię tę reguluje, jak już wcześniej wspomniano Dyrektywa 2008/110/WE z dnia 16 grudnia 2008 r. ([26]).

Wzmiankowana Dyrektywa nr 2008/110/WE z dnia 16 grudnia 2008 roku, zmieniająca dyrektywę 2004/49/WE dotyczącą bezpieczeństwa na kolei we Wspólnocie (Dyrektywa w sprawie bezpieczeństwa kolejowego), wprowadziła szereg zmian mających na celu usprawnienie i modernizację przepisów dotyczących certyfikacji bezpieczeństwa i utrzymania pojazdów kolejowych. Kluczowym elementem tej dyrektywy jest wprowadzenie definicji "podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie" (ECM, Entity in Charge of Maintenance), która ma na celu zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa oraz interoperacyjności systemów kolejowych poprzez odpowiednie zarządzanie procesem utrzymania pojazdów kolejowych.

Wprowadzenie do obowiązujących przepisów prawa podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie, było spowodowane koniecznością precyzyjnego określenia podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie danego pojazdu. Poprzednio odpowiedzialność ta, była rozproszona pomiędzy różnymi kategoriami podmiotów funkcjonujących w obszarze transportu kolejowego np. przewoźnikami, czy zakładami wykonującymi naprawy.

Zadaniem podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie jest zapewnienie, aby pojazdy, za których utrzymanie jest odpowiedzialny, mogły bezpiecznie poruszać się po sieci kolejowej. Narzędziem, które ma umożliwić osiągnięcie tego celu, jest system zarządzania utrzymaniem (ang. Maintenance Management System, MMS). Tak więc MMS, to konkretne procedury i instrukcje, które powinny być stosowane w ramach danego podmiotu, tak aby zapewnić minimalizację ryzyka związanego z prowadzoną działalnością utrzymaniową.

Konkretne określenie "podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie" znajduje się w Artykule 14a dyrektywy 2008/110/WE ([26]). Zgodnie z tym przepisem, przed wprowadzeniem pojazdu do eksploatacji każdy pojazd musi być przypisany do agencji, która odpowiada za jego utrzymanie. Podmioty odpowiedzialne za utrzymanie wagonów towarowych podlegają obowiązkowi certyfikacji. Certyfikacja w odniesieniu do pozostałych podmiotów odpowiedzialnych za utrzymanie, to jest zajmujących się utrzymaniem wagonów pasażerskich, lokomotyw czy zespołów trakcyjnych, nie jest obecnie wymagana.

Dyrektywa ta jest elementem starań o stworzenie jednolitego systemu bezpieczeństwa transportu kolejowego w UE. Obejmuje też uproszczenie i nowoczesne zarządzanie przepisami dotyczącymi certyfikacji i autoryzacji pojazdów kolejowych.

Równoległe z wymogiem dotyczącym wskazania, dla każdego pojazdu kolejowego eksploatowanego na ogólnodostępnej sieci kolejowej, podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie, **wszystkie pojazdy (w tym również eksploatowane poza ogólnodostępną siecią**

kolejową) na mocy przepisów krajowych powinny posiadać tzw. dokumentację systemu utrzymania (DSU), zatwierdzaną przez Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego.

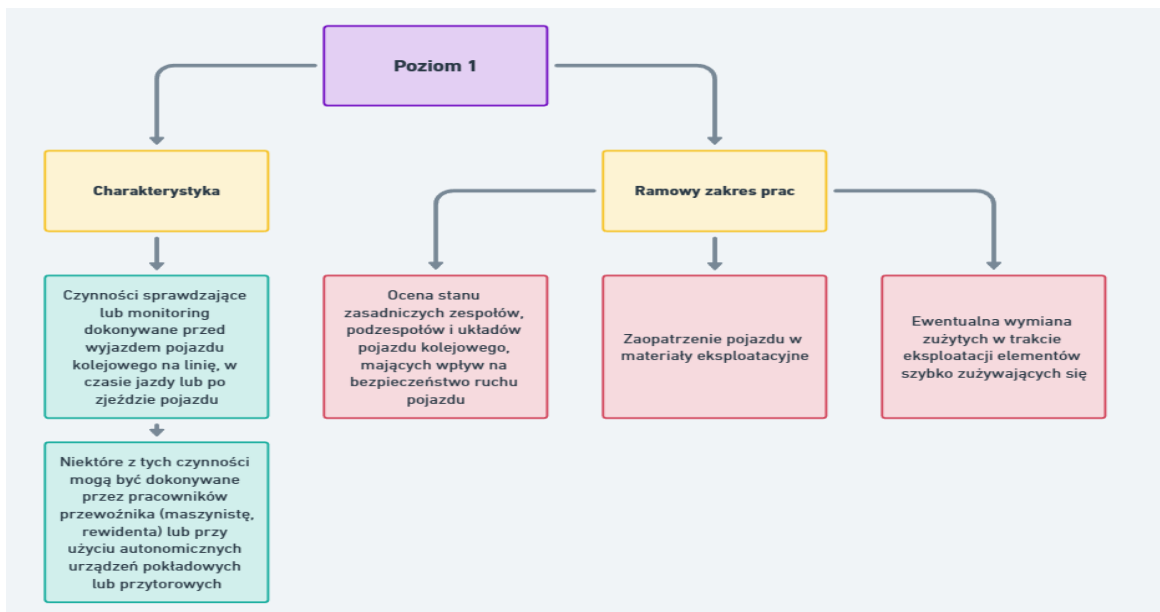
W warunkach polskich kwestia utrzymania pojazdów kolejowych uregulowana jest przede wszystkim w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 roku, w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (tj. Dz.U.2016.226) – zwanym w niniejszej rozprawie Rozporządzeniem [70].

Rozporządzenie wydane zostało na podstawie delegacji ustawowej, to jest na podstawie przepisu art. 20 ustawy z dnia 28 marca 2003 roku o transporcie kolejowym (Dz.U. z 2015 r. poz. 1297, z późn. zm.) [81]. Zgodnie z tą delegacją – wydane na jej podstawie przepisy wykonawcze (Rozporządzenie), określają ogólne warunki techniczne eksploatacji pojazdów kolejowych, tak aby pojazdy te spełniały warunki bezpieczeństwa ruchu kolejowego, oraz mogły być przemieszczane w składach tych samych pociągów, a ich przemieszczanie po liniach kolejowych było technicznie możliwe.

Określone w Rozporządzeniu ogólne warunki techniczne eksploatacji pojazdów kolejowych dotyczą pojazdów kolejowych kolei normalnotorowych, wąskotorowych, szerokotorowych i pojazdów kolejowych metra. Zgodnie z definicją zawartą w Rozporządzeniu [70] określenie *poziom utrzymania pojazdu kolejowego* (§ 2 punkt 1 Rozporządzenia [70]) to: **zestawienie czynności utrzymaniowych wykonywanych dla danego pojazdu kolejowego określone zakresem tych prac.**

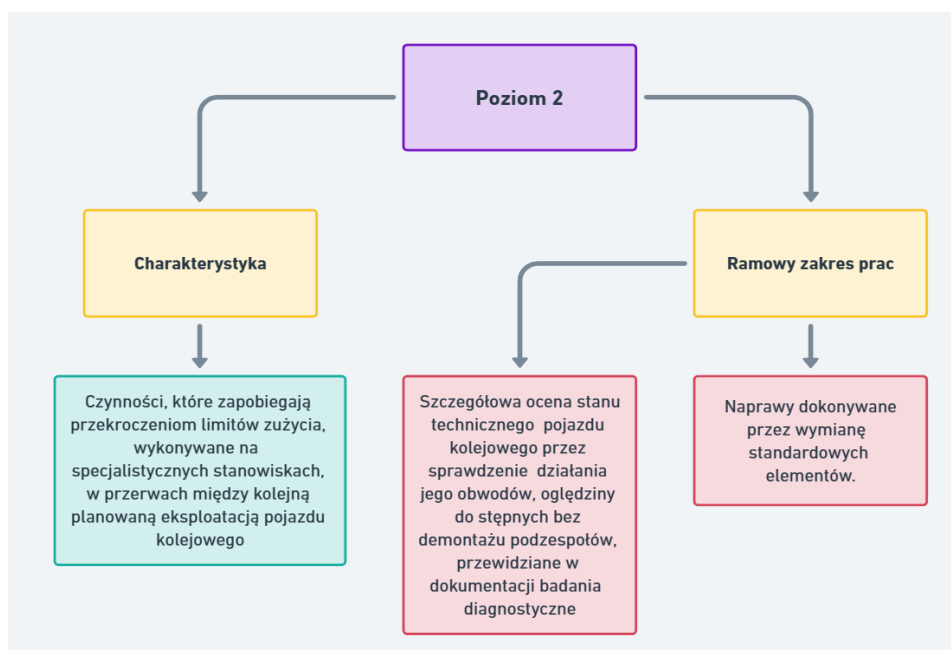
Nie każdy podmiot może realizować zadania związane z utrzymaniem pojazdów kolejowych. Takie zadania mogą być wykonywane **tylko** przez podmioty posiadające wykwalifikowanych pracowników, zaplecze techniczne oraz warunki organizacyjne gwarantujące prawidłowe wykonywanie prac określonych w dokumentacji systemu utrzymania (§ 6 Rozporządzenia [70]).

Warunkiem eksploatacji pojazdu kolejowego jest posiadanie **zatwierdzonej przez Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego** dokumentacji systemu utrzymania pojazdu kolejowego (§ 17 Rozporządzenia [70]). Załącznik numer 3 do wzmiankowanego Rozporządzenia [70] definiuje bardziej dokładnie zakresy czynności na każdym poziomie utrzymania od P1 do P5. Wymagania przedstawione w tym załączniku obrazują rysunki od 1.3 do 1.7.



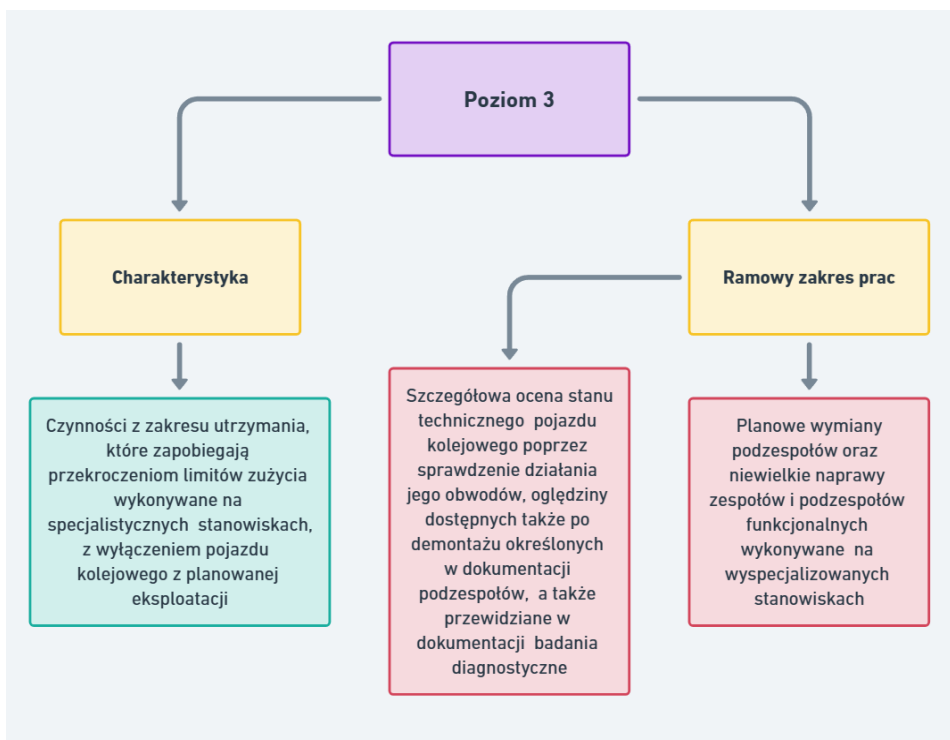
Rys. 1.3. Gradacja i opis poziomów utrzymania – poziom P1

źródło: opracowanie własne



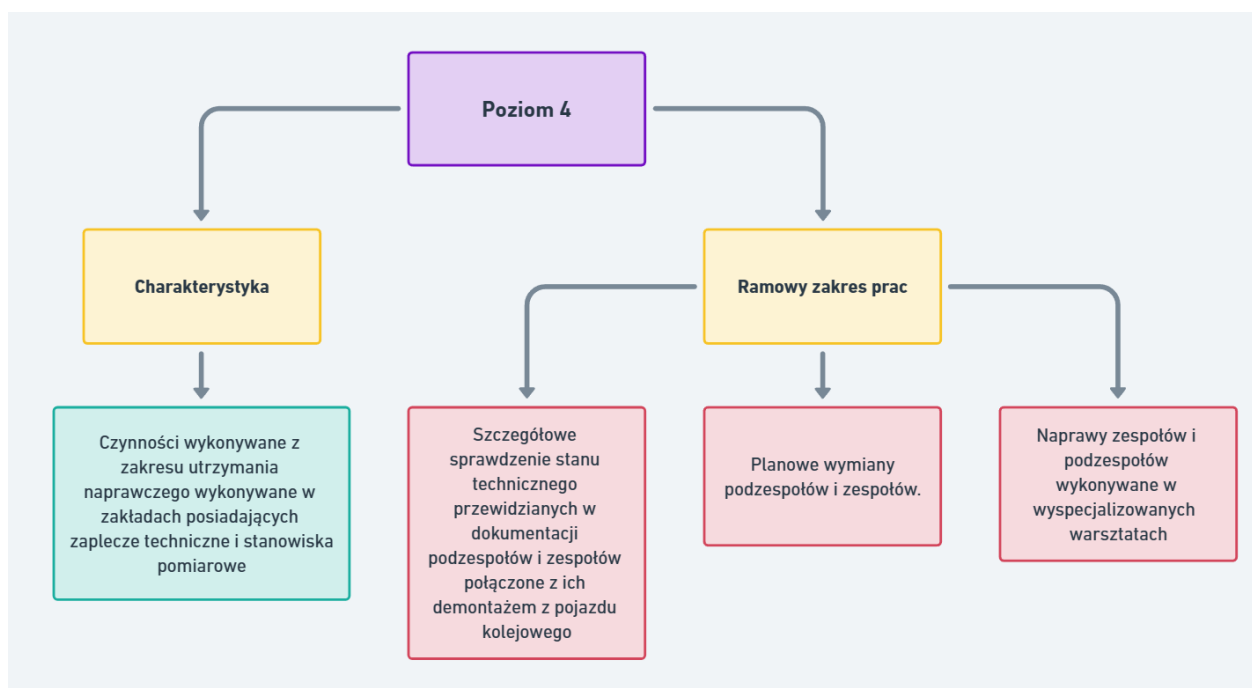
Rys. 1.4. Gradacja i opis poziomów utrzymania – poziom P2

źródło: opracowanie własne



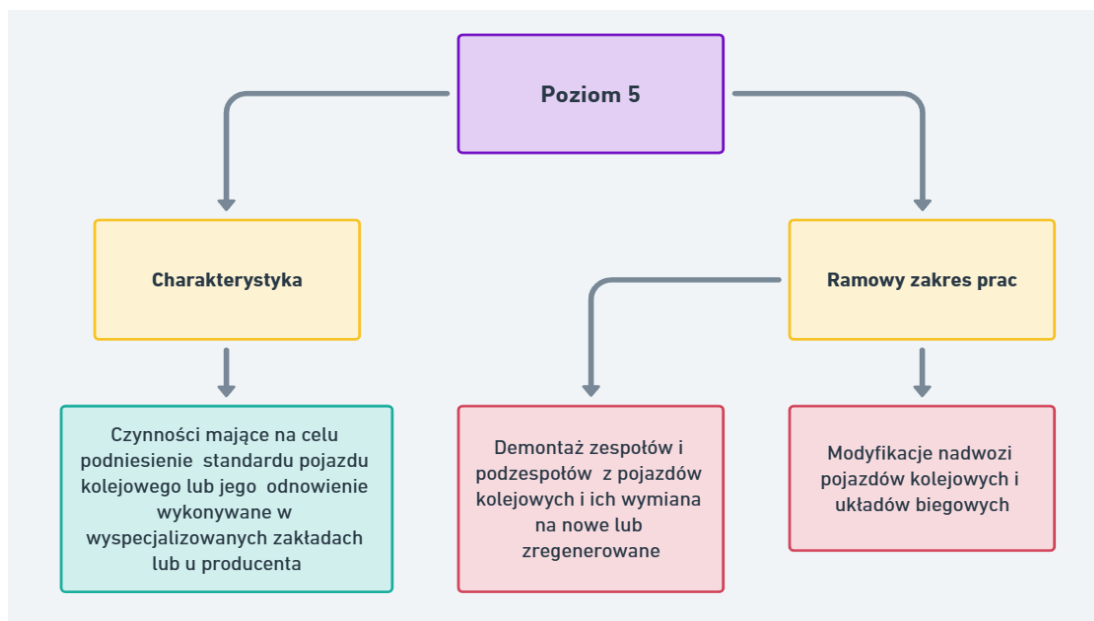
Rys. 1.5. Gradacja i opis poziomów utrzymania – poziom P3

źródło: opracowanie własne



Rys. 1.6. Gradacja i opis poziomów utrzymania – poziom P4

źródło: opracowanie własne



Rys. 1.7. Gradacja i opis poziomów utrzymania – poziom P5

źródło: opracowanie własne

Przedstawione na rysunkach od 1.3 do 1.7 wytyczne w zakresie charakterystyk i ramowego zakresu prac, szczegółowo definiują czynności konieczne na każdym z poziomów utrzymania. Stan prawny, zatem nie pozwala na dowolną modyfikację cyklu przeglądowo-naprawczego, a odstępstwo od wymogów Rozporządzenia [70] obliuguje do uzyskania stosownego odstępstwa od jego reguł. Jak wynika z powyższego opisu zastosowanie współczesnych rozwiązań elektronicznych i w konsekwencji rezygnacja w części z niektórych czynności na określonym poziomie dotychczasowego, klasycznego modelu eksploatacji pojazdów kolejowych, wymagać będzie akceptacji regulatora krajowego dla tego procesu tj. Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego.

2. Cel, teza i zakres rozprawy

Klasyczna metoda utrzymania pojazdów kolejowych metra zakłada pięć poziomów utrzymania opisanych w rozdziale pierwszym, z których pierwsze trzy to poziomy przeglądowe, a dwa ostatnie to poziomy naprawcze zazwyczaj podzielone jeszcze na podpoziomy. Metoda ta bazuje na odtwarzaniu zdolności eksploatacyjnych pojazdu w procesie utrzymania. Jakość wykonania, istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji, elementów i doświadczenia eksploatacyjne potwierdzają bardzo dobry stan tych elementów na kolejnych poziomach utrzymania.

Dostępne elektroniczno-informatyczne metody pomiaru, przesyłania, agregacji i analizy „on-line” opisane w rozdziale pierwszym pozwalają na zmianę klasycznego sposobu eksploatacji pojazdów na system predykcyjny. Dlatego też autor rozprawy podjął działania mające na celu opracowanie takiego systemu utrzymania taboru kolejowego metra, co w ocenie autora będzie bardzo korzystnym procesem optymalizacji utrzymania taboru kolejowego.

Projekt opracowania systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra z wykorzystaniem nowoczesnych technologii elektronicznych i informatycznych stanowi innowacyjne podejście do zarządzania i monitorowania stanu technicznego taboru zarówno w Polsce jak też na świecie. Stąd, celem głównym jest stworzenie zaawansowanego systemu umożliwiającego gromadzenie, transmisję i analizę danych pochodzących z pojazdów w czasie rzeczywistym. Pozwoli to na szybką i częściowo automatyczną ich ocenę i określenie zdolności pojazdu do dalszej eksploatacji, a jednocześnie zapewnienie większego poziomu bezpieczeństwa użytkowania. Ogólnie cel główny zdefiniowano jako:

„Opracowanie systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem technologii elektronicznych i informatycznych dla transmisji danych on-line na potrzeby oceny technicznej istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji części elementów pojazdów użytkowanych przez metro”.

Natomiast w ramach celów cząstkowych rozprawa zakłada dokonanie przeglądu literatury dotyczącej metod utrzymania taboru oraz jej trendów rozwojowych (zawarte w rozdziale pierwszym), analizę możliwości wykorzystania technologii elektronicznych i informatycznych w tym zakresie, opracowanie modelu predykcyjnego utrzymania bazującą na opisywanych narzędziach oraz weryfikację i ocenę skuteczności tego modelu. Poniżej przedstawiono szczegółowe rozszerzenie tych założeń.

Jak wskazano powyżej celem głównym rozprawy jest *opracowanie systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem technologii elektronicznych i informatycznych dla transmisji danych on-line*. Wymaga to analizy szeregu aspektów począwszy od nowoczesnych technologii informatycznych i elektronicznych po metody zbierania danych on-line, ich przetwarzania i formułowania strategii utrzymania.

Rozwój technologii informatycznych i elektronicznych otwiera nowe perspektywy dla monitorowania i utrzymania pojazdów kolejowych. Wdrażanie systemów umożliwiających zbieranie danych bezpośrednio z pojazdów w ruchu i ich on-line transmisja do stacji techniczno-postojowych umożliwi natychmiastową ocenę stanu technicznego pojazdów oraz ich zdolności do eksploatacji, a szczególnie ich elementów biegowych, podstawowych dla bezpieczeństwa elementów. Taki system pozwoli na automatyczną diagnozę potencjalnych awarii i szybką reakcję na wykryte nieprawidłowości. Pozwoli to na znaczne podniesienie poziomu bezpieczeństwa pojazdów oraz zwiększy efektywność w eksploatacji taboru.

Realizacja tego celu wymaga przygotowania i rozwoju specjalistycznego oprogramowania analitycznego oraz zastosowania czujników i urządzeń komunikacyjnych zdolnych do pracy w trudnych warunkach kolejowych. Zatem, jednym z głównych elementów realizacji celu rozprawy jest opracowanie modelu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego. Opracowanie modelu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego opiera się w istotnej części na analizie gromadzonych danych z eksploatacji pojazdów i danych technicznych, w celu przewidywania przyszłego stanu podzespołów pojazdów, oceny ich sprawności i potrzeb serwisowych w przewidywanej przyszłości. Możliwe jest, w tym przypadku, wykorzystanie np. metod sztucznej inteligencji do analizy zarejestrowanych z sensorów pojazdu i uczenia maszynowego do analizy otrzymywanych danych przez identyfikację wzorców wskazujących na potencjalne usterki lub proces starzenia przed wystąpieniem negatywnych skutków tego procesu. W efekcie, możliwe będzie przejście od reaktywnego sposobu utrzymania wykorzystywanego obecnie powszechnie na model proaktywny, gdzie utrzymanie zwiększy poziom bezpieczeństwa i niezawodność pojazdów, a także ograniczy ich przestoje. Weryfikacja modelu na danych rzeczywistych pozwoli na jego kalibrację i optymalizację, zapewniając wysoką skuteczność predykcji.

Mając na uwadze powyższe, **cele cząstkowe niezbędne do osiągnięcia w trakcie realizacji celu głównego** rozprawy zostały zapisane następująco:

- a) *Analiza dostępnej literatury w zakresie istniejących metod utrzymania taboru kolejowego.*

Krytyczna analiza literatury pozwoli na lepsze zidentyfikowanie i zrozumienie obecnie stosowanych metod utrzymania taboru kolejowego, ich efektywności oraz ograniczeń. Umożliwi to jednocześnie identyfikację potencjalnych obszarów dla innowacji proponowanej w rozprawie oraz zapewni podstawę teoretyczną dla opracowywanego projektu. Przegląd ten będzie również służył do wskazania trendów rozwojowych w dziedzinie technologii stosowanych w utrzymaniu taboru oraz potencjalnych kierunków badań.

- b) *Analiza i ocena możliwości zastosowania dostępnych technologii elektronicznych i informatycznych.*

Przegląd i analiza dostępnych nowoczesnych technologii elektronicznych i informatycznych pozwoli na dokładne zbadanie i ocenę ich potencjału w kontekście utrzymania taboru kolejowego, co jest kluczowe dla osiągnięcia celu rozprawy. Rozpatrzenie różnorodnych rozwiązań, takich jak czujniki stanu, systemy telemetrii oraz platformy analizy danych, pozwoli na wybór najbardziej efektywnych i dostosowanych do specyfiki działalności kolejowej technologii. Analiza ta powinna również uwzględniać aspekty integracji tych technologii z istniejącymi systemami zarządzania taboru oraz warunki ich pracy w tunelach metra.

- c) *Opracowanie modelu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego.*

Aby opracować adekwatny do sytuacji decyzyjnej model, niezbędne jest przygotowanie odpowiednich założeń oraz warunków brzegowych w jakich będzie on działał. Warunki takie będą określały parametry, ich prawidłowe zakresy oraz sposób ich oceny, na podstawie której system będzie określał pozostały czas zdatności pojazdu do eksploatacji. Na tej podstawie system predykcyjny będzie przedstawiał, które elementy i w jakim zakresie czynności powinny być realizowane na danym poziomie utrzymania.

- d) *Weryfikacja i ocena wpływu i skuteczności opracowanego modelu, poprzez przeprowadzenie przygotowanych testów i analiz.*

Weryfikacja ta powinna być przeprowadzona w warunkach rzeczywistych lub zbliżonych do rzeczywistych. Ponadto powinna być oparta na konkretnych danych rejestrowanych z pojazdów, aby móc realnie ocenić efektywność zastosowanego rozwiązania oraz wpływ potencjalnego wdrożenia modelu na poprawę bezpieczeństwa i efektywność utrzymania taboru. Ważne jest, aby analiza ta uwzględniała również aspekty ekonomiczne, takie jak potencjalne oszczędności wynikające z minimalizacji przestojów i kosztów napraw.

Realizacja wymienionych powyżej celów cząstkowych wymaga interdyscyplinarnego podejścia, łączącego wiedzę z dziedziny inżynierii kolejowej, informatyki, elektroniki oraz analizy danych. Osiągnięcie realizacji celu rozprawy może przyczynić się do znaczącej poprawy efektywności i bezpieczeństwa eksploatacji taboru kolejowego, otwierając nowe perspektywy dla branży transportu kolejowego.

Realizacja zarówno celu głównego jak też celów cząstkowych pozwala **na sformułowanie na ich podstawie tezy**. Tezę rozprawy zdefiniowano następująco:

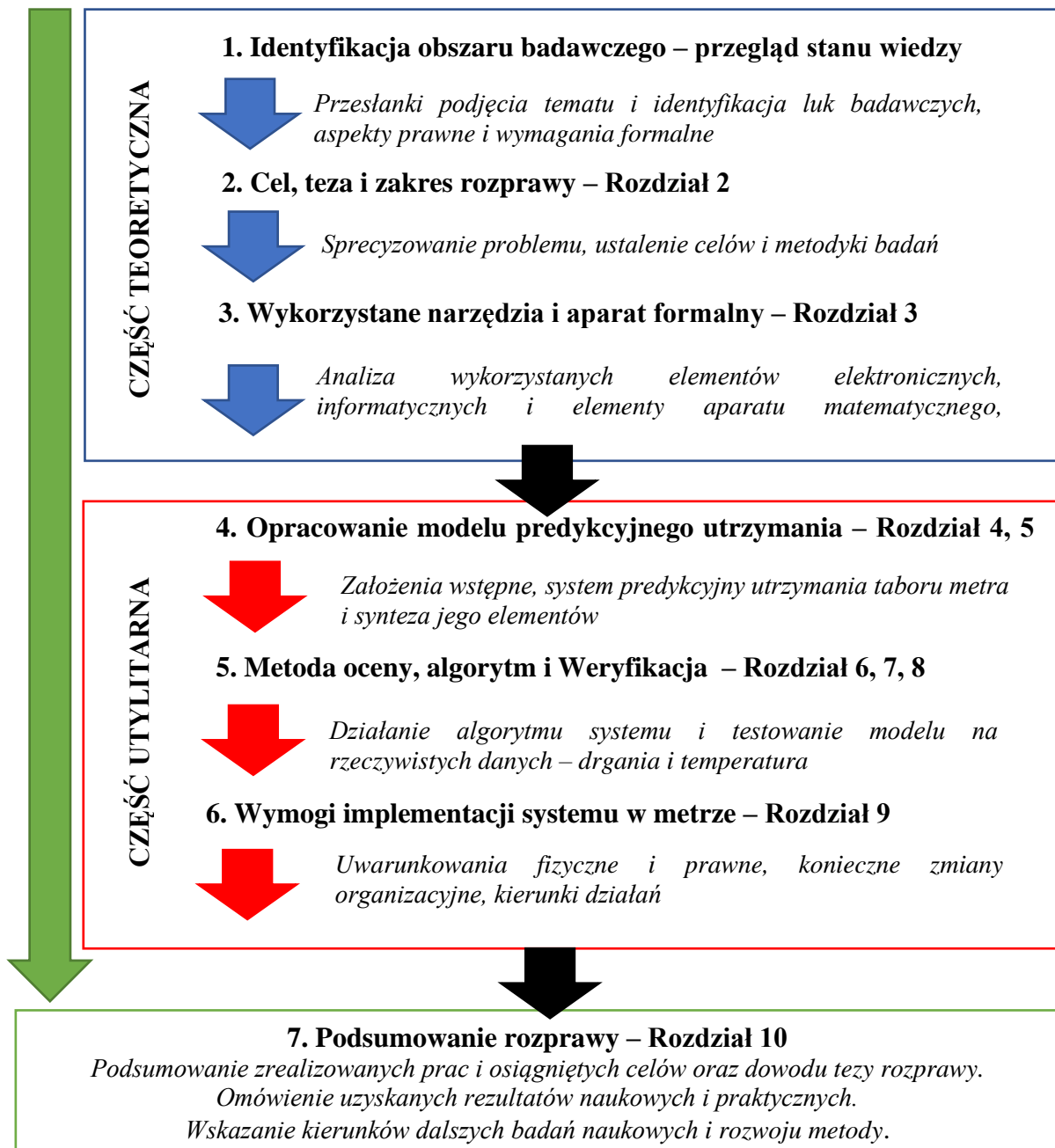
Stosowanie narzędzi elektronicznych i informatycznych, w tym wnioskowania statystycznego oraz transmisji on-line umożliwi opracowanie efektywnego predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego, który zwiększa bezpieczeństwo i efektywność eksploatacji pojazdów oraz ich dostępność, jednocześnie automatyzując i zmniejszając nakład pracy w zakresie utrzymania.

Skonstruowanie systemu utrzymania predykcyjnego oraz pozytywne przetestowanie go na prawdziwych danych pozwoli na potwierdzenie sformułowanej tezy. Z tego wynika, że rozprawa ma znaczenie zarówno utylitarne jak i też poznawcze.

Przedstawiony materiał ma znaczące implikacje zarówno w aspekcie poznawczym, jak i utylitarnym, ukazując przyszłościową perspektywę zarządzania i utrzymania taboru kolejowego. W aspekcie poznawczym, realizacja celu rozprawy rzuca światło na potencjalne możliwości integracji nowoczesnych technologii elektronicznych i informatycznych z tradycyjnymi systemami utrzymania pojazdów kolejowych. Pokazuje, jak zaawansowane systemy analizy danych, a nawet uczenie maszynowe mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia procesów utrzymaniowych i serwisowych, identyfikacji wzorców stanu elementów pojazdu oraz przewidywania przyszłych potrzeb utrzymaniowych. Wiedza ta jest kluczowa dla rozwoju teorii i praktyki w dziedzinie inżynierii kolejowej oraz informatyki, poszerzając jednocześnie granice stosowania technologii w transporcie kolejowym.

Z perspektywy utylitarnej, badania opisane w rozprawie mają istotne znaczenie nie tylko dla kolei, ale także dla całości przemysłu transportowego, oferując realne korzyści w zakresie zwiększenia bezpieczeństwa, niezawodności oraz efektywności operacyjnej taboru transportowego. System pozwalający na proaktywne utrzymanie i predykcyjną diagnozę stanu technicznego pojazdów może znacząco zmniejszyć ryzyko awarii, ograniczyć przestoje oraz obniżyć koszty związane z eksploatacją i naprawami. Taka zmiana paradygmatu z reaktywnego na proaktywne utrzymanie nie tylko poprawi operacyjność i dostępność taboru, ale również zwiększy bezpieczeństwo pasażerów.

W konkluzji należy podkreślić, że badania przedstawione w rozprawie wskazują, jak technologiczne innowacje mogą służyć rozwojowi społeczeństwa poprzez poprawę kluczowych usług publicznych, takich jak transport kolejowy. Demonstrują synergiczny potencjał połączenia wiedzy inżynierskiej i informatycznej dla rozwiązania istotnych problemów operacyjnych, wskazując na ważną rolę, jaką nauka i technologia odgrywają w tworzeniu bezpieczniejszego i bardziej efektywnego świata. Rysunek 2.1 przedstawia plan rozprawy wraz z opisem ogólnym jej etapów.



Rys. 2.1. Schemat rozprawy doktorskiej

źródło: opracowanie własne.

3. Narzędzia wykorzystywane w proponowanym w rozprawie rozwiązaniu

3.1. Elementy elektroniczne i ich znaczenie dla budowy modelu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego

Na podstawie badań literaturowych przedstawionych w podrozdziale 1.3 można scharakteryzować zestaw elementów niezbędnych do realizacji założonej idei. W tym ujęciu główne obszary rozwiązań dotyczą takich elementów jak:

- sensory,
- tory sygnałowe pojazdu,
- moduły agregacji danych na pojeździe,
- moduły zdalnego przesyłania danych do stacji techniczno-postojowej,
- bliźniak cyfrowy agregujący, indeksujący i dywersyfikujący otrzymane dane.

W ramach tej części, zasadna będzie prezentacja poszczególnych grup rozwiązań. W pierwszej kolejności zostały przedstawione **elementy sensoryczne**.

Sensory. Pierwszą grupą elementów są **sensory**, czyli grupa urządzeń do pomiaru wielkości fizycznych [48]. Ich liczba i rodzaje są praktycznie nieograniczone, jednak w przypadku badań prowadzonych w rozprawie w zupełności wystarczy kilka grup takich przyrządów. Do elementów, które będą z tego punktu widzenia najistotniejsze można zaliczyć: urządzenia do pomiaru prądu i napięcia, akcelerometry, urządzenia do pomiaru temperatury. W pojazdach wykorzystuje się także inne urządzenia pomiarowe, ale wymienione przez autora będą dla potrzeb rozprawy wystarczające.

Sensory to elementy nieodzowne w nowoczesnej infrastrukturze kolejowej czy taborze kolejowym, gdzie ich rola w zapewnieniu bezpieczeństwa, niezawodności i efektywności operacyjnej jest bardzo duża [55], [78]. Dla przykładu można podać kilka zastosowań w przemyśle i w kolejnictwie.

Akcelerometry - jest to podstawowy element identyfikacji poprawności działania ważnych dla bezpieczeństwa eksploatacji elementów. Akcelerometry są coraz częściej standardowym wyposażeniem w monitorowaniu stanu technicznego infrastruktury i taboru kolejowego. Przykładowo model ADXL345 [31] od Analog Devices, oferujący wysokiej jakości dane przy małym poborze mocy, jest idealny do zastosowań w mobilnych systemach monitorowania pojazdów. Dzięki możliwości pracy w szerokim zakresie temperatur, od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$, sprawdza się w ekstremalnych warunkach kolejowych. Kolejny model, K-Beam 8345A3 od

Kistler [35], jest przykładem akcelerometru piezoelektrycznego, który ze względu na swoją odporność na wibracje i uderzenia, jest szczególnie użyteczny w monitorowaniu torów, mostów oraz do instalacji na taborze kolejowym. Wykorzystanie i analiza drgań z akcelerometrów oraz ich wpływ na otoczenie zewnętrzne są autorowi znane z własnej pracy [53].

Czujniki temperatury. Czujniki temperatury są istotnym elementem bezpieczeństwa potwierdzającym prawidłowość działania elementów dynamicznych pojazdu czy infrastruktury i pełnią istotną rolę w zapobieganiu zdarzeniom krytycznym. Przykładowo termistory NTC od Vishay [39], są wykorzystywane do szybkiego wykrywania wzrostu temperatury w łożyskach, co pozwala na wczesne interwencje i zapobiega poważnym uszkodzeniom maszyn. Z kolei czujniki PT100, ze względu na swoją precyzyjną charakterystykę pomiarową, są idealne do kontroli temperatury w trudno dostępnych lub niebezpiecznych lokalizacjach, takich jak wnętrza silników trakcyjnych.

Kamery termowizyjne. Kamery termowizyjne są dodatkowym elementem służącym do wykrywania anomalii cieplnych. Mogą one wskazywać na potencjalne usterki czy przegrzewanie się elementów. Mają one tę zaletę, że obejmują swym zasięgiem wiele elementów jednocześnie i są istotnym czynnikiem bezpieczeństwa. W kolejnictwie, kamery takie jak FLIR C3 [32] lub FLIR E4 są stosowane do monitorowania systemów trakcyjnych, silników i innych krytycznych komponentów pojazdów kolejowych. Dzięki ich użyciu, grupy utrzymaniowe są w stanie szybko zidentyfikować źródło problemu i rozwiązać go, zanim nastąpi poważna awaria.

Czujniki prądu i napięcia. Czujniki prądu i napięcia są niezbędne dla efektywnego zarządzania systemami elektrycznymi i elektronicznymi pociągów. Przykładowo przekładniki prądowe serii CR Magnetics czy firmy LEM [36] umożliwiają dokładne monitorowanie wartości prądu, co pozwala kontrolować, sterować i optymalizować jego wartość, a w konsekwencji pracę systemów trakcyjnych. Czujniki te, ze względu na swoje zaawansowane funkcje, pozwalają na bieżące analizy i interwencje, minimalizując ryzyko przeciążeń i awarii.

Podsumowując, współczesne rozwiązania w dziedzinie sensorów kolejowych nie ograniczają się tylko do monitorowania i kontroli, ale też wstępnej obróbki rejestrowanych danych i przekształcania ich w sygnały cyfrowe. Zaawansowane analizy danych zbieranych przez sensory pozwalają na wczesne rozpoznawanie potencjalnych awarii i planowanie konserwacji w najbardziej optymalnym czasie. Dzięki tym technologiom, zarządzanie infrastrukturą kolejową staje się bardziej proaktywne, co przekłada się na zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa w transporcie kolejowym.

Tory transmisyjne i sygnałowe pojazdu. Tory transmisyjne i sygnałowe w nowoczesnych pojazdach kolejowych są ważnymi elementami systemów sterowania pojazdu, które zapewniają przesyłanie danych i sygnałów między różnymi komponentami czy też wagonami pojazdu. Te zaawansowane systemy sieciowe powinny spełniać wysokie wymagania dotyczące niezawodności, szybkości i odporności na zakłócenia, aby zapewnić bezpieczeństwo i efektywność operacyjną.

Tory transmisyjne w pojazdach kolejowych często wykorzystują specjalnie zaprojektowane i wykonane na zamówienie kable i przewody, które powinny być odporne na wysokie napięcia, ekstremalne temperatury i drgania czy zakłócenia elektromagnetyczne. Przykładowo, kable typu Ethernet używane w sieciach TCP/IP spełniają standardy takie jak: CAT5e lub CAT6, zapewniając przesył danych z prędkością do 1 Gbps w warunkach pracy pojazdu czyli przy zmiennych temperaturach i drganiach o różnym natężeniu. Kable takie są często w oplocie lub ekranowane, aby zmniejszyć wpływ zakłóceń elektromagnetycznych, co jest kluczowe w gęsto zabudowanych i elektrycznie aktywnych przestrzeniach pojazdów kolejowych. Jednak infrastruktura kablowa stanowi tylko jeden z elementów toru transmisyjnego. Kolejną kwestią jest logika przesyłania sygnałów, która zdaniem autora jest ściśle związana z wybranym systemem zarządzania pojazdem. Jeżeli przyjmimy predykcyjny system zarządzania, to musimy zaplanować sensoryczny system przesyłania danych z pojazdu.

Współczesne pojazdy kolejowe często stosują *sieci CAN (Controller Area Network)*, które umożliwiają komunikację między mikrokontrolerami i urządzeniami pojazdu bez potrzeby dodatkowego urządzenia w postaci hosta komputerowego. Sieci te są szczególnie cenione za ich odporność na zakłócenia i zdolność do pracy w czasie rzeczywistym, co jest niezbędne dla systemów sterowania pojazdami. Na przykład, sieć CAN w lokomotywach może być używana do monitorowania i kontroli systemów napędowych, hamulcowych oraz innych systemów bezpieczeństwa. Sieć tego typu jest wykorzystywana w pojazdach typu *INSPIRO* produkcji Siemens, jeżdżących w warszawskim metrze.

FIP (Factory Instrumentation Protocol) to kolejna technologia stosowana w torach sygnałowych, która pozwala na komunikację w środowiskach o wysokim stopniu automatyki. Protokół ten jest często wykorzystywany do zarządzania sygnałami i danymi w pojazdach kolejowych, gdzie wymagana jest szybka i niezawodna wymiana informacji między różnymi systemami. FIP zapewnia wysoki poziom determinizmu i synchronizacji, co jest kluczowe dla precyzyjnego działania zaawansowanych systemów kolejowych. Tego typu sieć jest zastosowana w pojazdach typu *METROPOLIS* Alstom, jeżdżących w warszawskim metrze.

Każda z tych technologii musi spełniać specyficzne normy i standardy branżowe, aby zapewnić kompatybilność i bezpieczeństwo na wszystkich poziomach funkcjonowania pojazdu kolejowego. Na przykład, standardy takie jak EN 50155 dotyczące urządzeń elektronicznych stosowanych w pojazdach kolejowych, określają wymagania dotyczące temperatury pracy, odporności na wibracje i zakłócenia elektromagnetyczne.

Zastosowanie zaawansowanych technologii kablowych, sieci i protokołów transmisyjnych w pojazdach kolejowych ma kluczowe znaczenie dla ich wydajności, niezawodności i bezpieczeństwa. Rozwój tych technologii jest ciągły, a ich integracja z nowoczesnymi systemami zarządzania i analizy danych otwiera nowe możliwości dla przyszłych innowacji w branży kolejowej.

Moduły agregacji danych. Moduły agregacji danych w pojazdach kolejowych pełnią kluczową rolę w zbieraniu, przetwarzaniu i przygotowywaniu danych pochodzących z różnorodnych czujników na potrzeby monitorowania [55], diagnostyki [78] oraz optymalizacji działania pojazdu [12]. Te zaawansowane systemy powinny spełniać wysokie standardy dotyczące niezawodności, szybkości przetwarzania i integracji danych z różnych źródeł, a jednocześnie być odporne na zmiany temperatury w ich szerokich granicach oraz na pracę w środowisku stałych drgań.

Moduły agregacji danych są projektowane tak, aby efektywnie zarządzać i integrować strumienie danych z wielu czujników, takich jak akcelerometry, czujniki temperatury, czujniki prędkości, przekładniki prądowe i inne. Przykładowe systemy, takie jak *CompactRIO* firmy National Instruments [37], to modułowe platformy sprzętowe, które oferują nie tylko wysokiej klasy przetwarzanie sygnałów, ale również możliwości rozbudowy o dodatkowe moduły wejścia/wyjścia, co pozwala na elastyczną adaptację do potrzeb danego pojazdu kolejowego. *CompactRIO* wykorzystuje real-time processing i *FPGA* (*Field-Programmable Gate Array*) do przetwarzania danych w czasie rzeczywistym, co jest dla sterowania pojazdów wymagających szybkiej reakcji pojazdu i wysokiej przepustowości danych.

Innym przykładem jest system *QNX Neutrino RTOS*, system operacyjny zaprojektowany na potrzeby aplikacji o wysokiej dostępności i niezawodności. Jest on szeroko stosowany w pojazdach kolejowych do zarządzania danymi z czujników. *QNX* oferuje zaawansowane funkcje zarządzania pamięcią i procesami, co umożliwia efektywne przetwarzanie i przesyłanie danych z licznych sensorów oraz ich agregację w celu dalszej analizy i wykorzystania w systemach sterowania pojazdem lub oceny jest stanu przydatnej dla procesu utrzymania.

Moduły te często wyposażone są w różnego rodzaju zaawansowane oprogramowanie analityczne, przygotowane specjalnie dla nich, które pozwala na wstępne przetwarzanie

danych, takie jak filtracja, normalizacja i ich agregacja danych. Na przykład, *system HBM QuantumX* jest używany do precyzyjnego zbierania danych z sensorów, oferując jednocześnie funkcje zaawansowanej analizy sygnałów. Dzięki modularnej budowie i wsparciu dla szerokiej gamy typów sensorów, QuantumX może zbierać dane z różnych czujników w pojazdach kolejowych, zapewniając jednoczesną analizę i rejestrowanie danych krytycznych dla bezpieczeństwa i efektywności operacyjnej.

Integracja tych systemów z nowoczesnymi technologiami komunikacji, takimi jak sieci bezprzewodowe czy systemy oparte na „chmurze obliczeniowej”, umożliwia nie tylko lokalne, ale i zdalne monitorowanie stanu pojazdu kolejowego. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie zaawansowanych analiz predykcyjnych, które mogą wykrywać potencjalne problemy przed ich wystąpieniem, znacząco zwiększając niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji taboru kolejowego. Rozwój i implementacja modułów agregacji danych w pojazdach kolejowych w ostatniej dekadzie jest istotnym elementem dla zbudowania systemu predykcyjnego pojazdu i daje nowe możliwości w zakresie zarządzania danymi i analizy systemowej.

Moduły zdalnego przesyłania danych do stacji techniczno-postojowej. Transmisja danych zebranych przez moduły agregacji danych w pojazdach kolejowych do centrum zarządzania flotą jest kluczowym aspektem nowoczesnych systemów transportowych. Technologie przesyłania danych powinny zapewniać niezawodność przesyłu, odpowiednią szybkość i bezpieczeństwo przekazu, nawet w trudnych warunkach, takich jak tunele metra. Poniżej przedstawiono charakterystykę wybranych technologii stosowanych w tym celu.

Technologia GSM-R (Global System for Mobile Communications - Railway) jest rozwinięciem standardu GSM, dostosowanym specjalnie do potrzeb kolei. GSM-R oferuje nie tylko usługi głosowe, ale także specjalizowane usługi transmisji danych, które są kluczowe dla operacji kolejowych, w tym dla systemów sterowania ruchem pociągów. Jego główną zaletą to wysoka niezawodność i priorytetyzacja ruchu kolejowego nad inne formy komunikacji.

Innym często wykorzystywanym systemem jest transmisja poprzez sieć Wi-Fi. Wi-Fi może być wykorzystane dla poruszających się pojazdów, umożliwiając bezprzerwową komunikację między pojazdem a infrastrukturą sieciową, dzięki punktom dostępowym (Access Points - AP) i turboroamingowi. Punkty AP mogą być rozmieszczone stacjonarnie wzdłuż trasy pojazdu kolejowego tworząc lokalną sieć Wi-Fi. Najważniejszym mechanizmem jest turboroaming, który pozwala na błyskawiczne przełączanie urządzeń klienckich między AP bez zerwania połączenia. Rozwiązanie to wykorzystuje protokoły takie jak 802.11r (Fast Transition) oraz preautoryzację, co minimalizuje opóźnienia i utraty danych. Sieć taka zapewnia transmisję

danych dla nowoczesnych systemów transportowych. Dzięki temu system jest niezawodny, skalowalny i dostosowany do wymagań współczesnych pojazdów kolejowych.

Inną technologią, która jest już zaimplementowana w warszawskim metrze jest technologia radiowa *TETRA (Terrestrial Trunked Radio)*. Jest ona kolejnym przykładem rozwiązania dostosowanego do specyficznych potrzeb transportu kolejowego. TETRA jest często wykorzystywana do komunikacji głosowej i danych w warunkach, gdzie tradycyjne sieci mogą mieć ograniczoną efektywność, jak tunele czy obszary słabo zasięgowe. TETRA umożliwia szybką wymianę krótkich wiadomości danych, co jest przydatne w zarządzaniu flotą i monitorowaniu stanu pojazdów.

Wdrożenie tych technologii wymaga nie tylko zaawansowanego sprzętu, ale także współpracy z lokalnymi regulatorami i dostawcami infrastruktury telekomunikacyjnej, aby zapewnić ciągłość i bezpieczeństwo przekazu danych. Inwestycja w odpowiednie technologie komunikacyjne jest niezwykle istotna dla efektywnego i bezpiecznego zarządzania nowoczesną flotą kolejową, szczególnie w przypadku zdalnego sterowania pojazdami czy też ciągłego przesyłania danych diagnostycznych do systemów analitycznych.

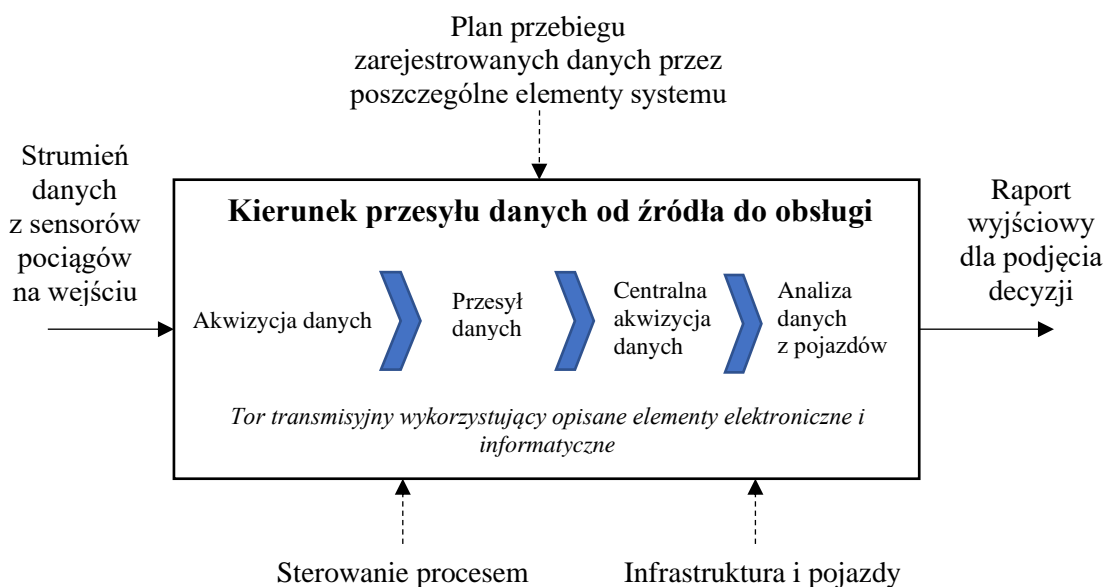
Bliźniak cyfrowy agregujący, indeksujący i dywersyfikujący otrzymane dane. Technologia "bliźniaka cyfrowego" (Digital Twin) stanowi przełom w zarządzaniu i monitorowaniu nowoczesnych systemów kolejowych [49], [22]. Bliźniak cyfrowy to zaawansowany model symulacyjny, który replikuje fizyczne właściwości, procesy i działania rzeczywistych systemów kolejowych, umożliwiając ich analizę, optymalizację oraz przewidywanie zachowania w czasie rzeczywistym [38], [29]. W kontekście transportu kolejowego, technologia ta wykorzystuje dane przesyłane z poszczególnych pojazdów, aby tworzyć szczegółowe i dynamicznie aktualizowane modele operacyjne.

Integracja danych w stacjonarnym bliźniaku cyfrowym to proces integracji danych z różnorodnych źródeł i zawierających różne typy danych, w tym z czujników umieszczonych na pojazdach, systemów sterowania ruchem kolejowym oraz systemów informacyjnych pasażerów. Dane te mogą obejmować parametry pracy silników, stan torów, warunki atmosferyczne, a także informacje o obciążeniu pojazdów i efektywności energetycznej. Przykładem zastosowania tej technologii może być Siemens Mobility, który oferuje rozwiązania "bliźniaka cyfrowego" dla pojazdów kolejowych, umożliwiające szczegółowe modelowanie i analizę danych operacyjnych w celu optymalizacji przebiegu podróży i konserwacji. Zastosowanie tej technologii w akumulacji i analizie danych pozwala na optymalizację procesów oraz ich kontrolę. Jako przykład wykorzystania można pokazać *GE Transportation*, które wykorzystuje "bliźniaki cyfrowe" do monitorowania lokomotyw i torów,

co pozwala na planowanie konserwacji predykcyjnej na podstawie symulowanych scenariuszy zużycia i uszkodzeń.

W tym obszarze można stosować różne technologie kumulacji i analizy danych. Jednak wydaje się, że obecnie technologia "bliźniaka cyfrowego" w transporcie kolejowym otwiera nowe możliwości dla zarządzania systemami kolejowymi poprzez dynamiczną symulację i analizę danych operacyjnych zbieranych przez czujniki na pojazdach oraz czujniki elementów infrastruktury odpowiadających za bezpieczeństwo prowadzenia ruchu kolejowego. Dzięki takiemu rozwiązaniu operatorzy, a w szczególności metro, mogą nie tylko zoptymalizować eksploatację pojazdów czy infrastruktury, ale również zwiększyć ogólne bezpieczeństwo i niezawodność systemu kolejowego, co w obecnych warunkach ma ogromne znaczenie.

Przedstawione w niniejszym rozdziale zestawienie elementów elektronicznych i systemów wykorzystywanych w rozwiązaniach kolejowych nie jest jedynym możliwym wyborem. To przykładowa prezentacja rozwiązań, które umożliwiają realizację idei przedstawianej w ramach niniejszej rozprawy. Wybór taki nie ogranicza się do przedstawionych elementów, a jedynie prezentuje przedstawicieli grupy rozwiązań. Ponadto trzeba podkreślić, że rynek ten zmienia się niezwykle dynamicznie i wciąż powstają nowe rozwiązania, co skutkuje tym, że problematyka ta jest otwarta. Rysunek nr 1.8 przekrojowo obrazuje przebieg strumienia danych od rejestracji w sensorach do analizy i przedstawienia odpowiedniego raportu obsłudze.



Rys. 3.1. Użycie poszczególnych elementów w procesie pozyskania i analizy danych
źródło: opracowanie własne

3.2. Elementy informatyczne i ich znaczenia dla koncepcji predykcyjnego modelu utrzymania taboru kolejowego

Jak już wskazano w rozdziale 1.1, na podstawie pracy [12], badania naukowe prowadzone są głównie w zakresie wykorzystania nowoczesnych technologii do szybkiego i skutecznego diagnozowania on-line stanu elementów pojazdu kolejowego odpowiedzialnych za bezpieczeństwo jego eksploatacji. Poza bezpieczeństwem istotne znaczenie ma komfort podróży, co autor analizował w ramach pracy [84]. Elementy elektroniczne opisane w rozdziale 3.1, realizują szeroki zakres funkcji od zbierania surowych danych z pojazdu, przesyłania do centrum utrzymania pojazdów do funkcji analitycznych. Niemniej jednak sercem każdego systemu decyzyjnego jest jego specjalistyczne oprogramowanie.

Zagadnienie jest na tyle nowe, że nie istnieją, wedle wiedzy autora, systemy realizujące dokładny zamysł niniejszej rozprawy doktorskiej. Wytworzenie i wdrożenie takiego narzędzia w opinii autora będzie jednym z ważniejszych narzędzi na rynku utrzymania taboru kolejowego w Polsce i na świecie.

Istnieją jednak systemy o funkcjonalnościach podobnych lub zbliżonych do systemu opisywanego. Podobne systemy nadzoru są już stosowane w różnych dziedzinach, zarówno w transporcie, jak i innych sektorach przemysłu. Należy wymienić m.in.:

➤ Systemy nadzoru w transporcie lotniczym:

Aircraft Condition Monitoring System (ACMS): ACMS jest systemem wykorzystywanym w lotnictwie do monitorowania stanu technicznego samolotów. System ten zbiera dane z różnych sensorów oraz systemów elektronicznych umieszczonych na pokładzie samolotu, takich jak czujniki ciśnienia, temperatury, wibracji, itp. [28].

Wymieniony system ACMS analizuje te dane w czasie rzeczywistym, wykrywając odchylenia od normy i przewidując potencjalne awarie. W przypadku wykrycia nieprawidłowości w stanie systemu lub działaniu jakiegokolwiek elementu statku powietrznego, system generuje raporty i alarmy przesyłane do zespołu technicznego, co umożliwia szybkie podjęcie działań naprawczych i przywrócenie stanu prawidłowego.

➤ Systemy monitorowania flot samochodowych:

Realizacja tego systemu nadzoru pojazdów samochodowych realizowana jest w technologii telematyki samochodowej. To technologia stosowana w zarządzaniu flotami pojazdów łącząca technologie telekomunikacyjne z informatyką. Systemy te monitorują i analizują różne parametry techniczne pojazdów, takie jak np. zużycie średnie i chwilowe paliwa, prędkość pojazdu, stan silnika, a nawet lokalizację GPS [25], [63]. Analiza tych danych pozwala na

optymalizację eksploatacji pojazdów samochodowych i poprawę bezpieczeństwa ich eksploatacji, co z kolei zwiększa bezpieczeństwo kierowców oraz redukuje koszty operacyjne floty poprzez przewidywanie i zapobieganie awariom.

➤ Systemy monitorowania infrastruktury kolejowej:

System Condition-Based Maintenance (CBM) służy do monitorowania stanu infrastruktury kolejowej [21]. Opiera się on na danych zbieranych z różnych sensorów zamontowanych na torach, rozjazdach i innych elementach infrastruktury. System ten analizuje dane w czasie rzeczywistym, wykrywając potencjalne nieprawidłowości działania czy też inne problemy techniczne, takie jak zużycie szyn, deformacje torów czy uszkodzenia rozjazdów. CBM umożliwia planowanie prac konserwacyjnych na podstawie rzeczywistego stanu technicznego. Pozwala to na zmniejszenie liczby niespodziewanych awarii i optymalizację kosztów utrzymania infrastruktury, a także zapobiega ewentualnym problemom realizacji przewozów wynikającym z konieczności wyłączenia części infrastruktury z eksploatacji na czas usunięcia usterki.

➤ Systemy nadzoru w energetyce:

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) to grupa systemów wykorzystywanych do nadzoru i kontroli infrastruktury energetycznej, takiej jak elektrownie, sieci przesyłowe oraz stacje transformatorowe. System SCADA zbiera dane z różnych punktów pomiarowych, analizuje je w czasie rzeczywistym i umożliwia operatorom monitorowanie stanu technicznego urządzeń, wykrywanie awarii oraz zarządzanie pracą całego systemu energetycznego. Dzięki systemom typu SCADA możliwe jest szybkie reagowanie na nieprawidłowości oraz optymalizacja procesów produkcji i dystrybucji energii.

➤ System nadzoru łożysk:

SKF Multilog IMx to system monitorowania stanu technicznego łożysk i innych elementów maszyn, który jest przeznaczony do zastosowań przemysłowych, w których wymagane jest zapewnienie wysokiej niezawodności pracy i dokładności działania urządzeń. System nadzoru łożysk firmy SKF [74] i posługuje się zaawansowanymi narzędziami do monitorowania stanu technicznego maszyn, które umożliwiają wczesne wykrywanie problemów technicznych oraz optymalizację harmonogramów konserwacji pozwalającą uniknąć kolizji z konieczną aktywnością maszyny. Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych technologii, takich jak czujniki wibracji i temperatury oraz zaawansowane algorytmy analizy danych, systemy te przyczyniają się do zwiększenia niezawodności i wydajności maszyn w różnych branżach przemysłu na całym świecie.

Konkludując należy podkreślić, że systemy nadzorowania stanu pojazdu kolejowego to zestaw zaawansowanych narzędzi, które dzięki integracji nowoczesnych technologii sensorowych, przesyłowych i analitycznych, pozwala na dokładne i prawie natychmiastowe monitorowanie i ocenę stanu technicznego pojazdu. Struktura funkcjonalna takich systemów obejmuje moduły akwizycji danych, analizy, interpretacji, alarmowania i prezentacji danych, co zapewnia kompleksową diagnostykę i szybkie reagowanie na wykryte problemy. Przykłady podobnych systemów w innych branżach pokazują, że podobne rozwiązania są skuteczne i szeroko stosowane w różnych dziedzinach przemysłu.

3.3. Narzędzia aparatu formalnego wykorzystywane w pracy

Dla potrzeb prowadzonych badań w rozprawie wykorzystywane są określone narzędzia aparatu matematycznego, które przedstawiają precyzyjnie idee przedstawione w dysertacji. Spośród wielu narzędzi formalnych wykorzystywanych w niniejszej pracy należy wyróżnić takie, które są dla jej realizacji niezwykle ważne. Do takich należy zaliczyć **teorię niezawodności i transformatę fouriera**.

Teoria niezawodności. Zgodnie z definicją *teoria niezawodności* to dział matematyki stosowanej, który zajmuje się oceną prawdopodobieństwa bezawaryjnego działania systemów technicznych oraz przewidywaniem procesu ich pracy w czasie [5], [85]. Główne jej elementy to analiza statystyczna, ocena ryzyka, badania czasu do awarii, trwałości oraz niezawodności urządzeń technicznych i systemów. Teoria niezawodności jest szeroko stosowana w różnych dziedzinach inżynierii, takich jak inżynieria systemów, inżynieria elektryczna, inżynieria oprogramowania oraz w przemyśle transportowym (kolejowym, lotniczym, motoryzacyjnym) czy w zarządzaniu ryzykiem.

Kluczowymi pojęciami w teorii niezawodności są m.in.:

- **Funkcja niezawodności $R(t)$** – prawdopodobieństwo, że system będzie działał bezawaryjnie przez określony czas [5], [85]:

$$R(t) = P(T \geq t) \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (3.1)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$$

gdzie:

t – czas pracy urządzenia,

T – zmienna losowa reprezentująca czas do awarii.

- **Funkcja zawodności (Dystrybuanta) $F(t)$** – miara prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w danym przedziale czasowym [5], [85]:

$$\begin{aligned} F(t) &= P(T < t) && \text{dla } t \geq 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) &= 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

gdzie:

t – czas pracy urządzenia,

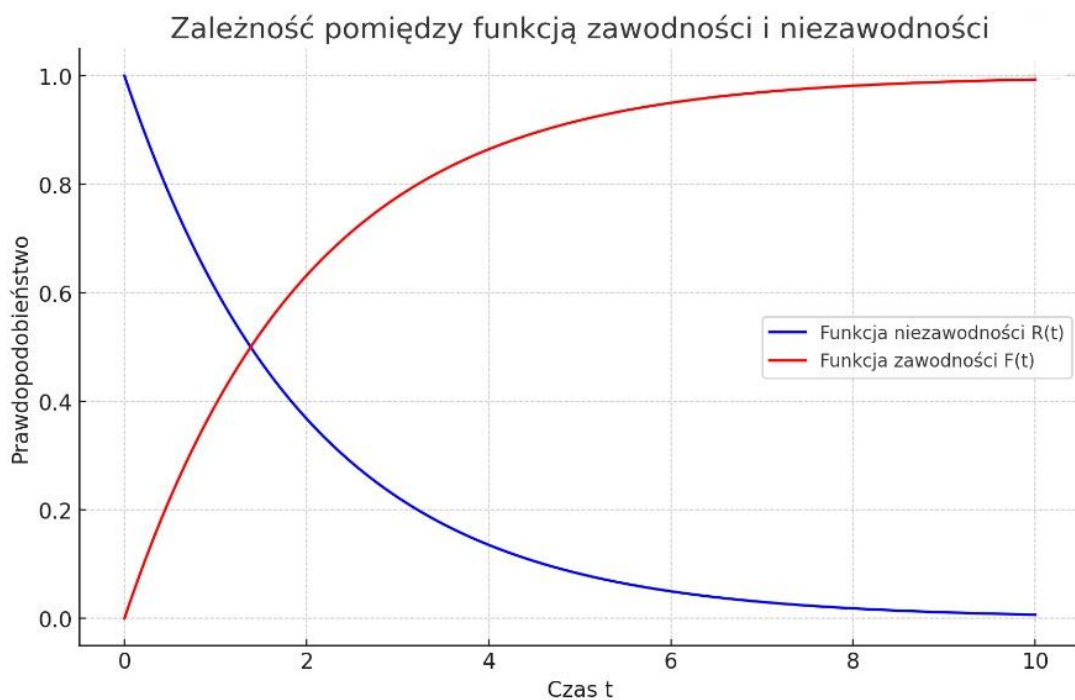
T – zmienna losowa reprezentująca czas do awarii.

Funkcja zawodności odpowiada dystrybuancie rozkładu zmiennej losowej T .

Ponadto:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3.3)$$

Zależność tę obrazuje wykres, rys.3.2.



Rys. 3.2. Zależność pomiędzy funkcją zawodności i niezawodności

źródło: opracowanie własne

- **Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu do awarii $f(t)$** – określa prawdopodobieństwo, że czas do awarii znajduje się w przedziale $[t, t+dt]$ [85]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (3.4)$$

- **Intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$** – określa częstość występowania awarii w momencie t , pod warunkiem, że system działał bezawaryjnie do czasu t . Jest definiowana jako [85]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{dla } t \geq 0 \quad (3.5)$$

$\lambda(t)$ pokazuje, jak zmienia się ryzyko awarii systemu w czasie. I tak na przykład:

- Stała $\lambda(t)$ wskazuje na systemy z losowymi awariami (np. rozkład wykładniczy).
 - Rosnąca $\lambda(t)$ wskazuje na systemy starzejące się (np. mechaniczne zużycie).
 - Malejąca $\lambda(t)$ wskazuje na systemy z "dziecięcymi chorobami" (np. awarie wczesne w fazie testowania).
- **Średni czas do awarii (MTTF)** – średni czas, w którym oczekuje się, że system będzie działał bezawaryjnie. MTTF pozwala porównać różne systemy lub komponenty pod kątem ich niezawodności, wybierając te o dłuższym oczekiwanym czasie działania. Producenci pojazdów kolejowych mogą używać MTTF do ustalania okresów gwarancyjnych, które minimalizują ryzyko awarii w tym okresie.
 - **Wskaźnik awaryjności** – wskaźnik określający częstość występowania awarii.

Przesłanką do zastosowania systemu predykcyjnego dla określonych elementów pojazdu szynowego jest doświadczenie eksploatacyjne autora, z którego wynika, że wiele elementów pojazdu jest projektowana bardzo konserwatywnie, z dużym zapasem bezpieczeństwa. Przykładowo, zapas ten dla łożysk maźnicy jest na tyle duży, że w ciągu 25 lat eksploatacji łożyska te, nie wykazywały najmniejszych przesłanek zużycia, a zalecane czynności konserwacyjne potwierdziły doskonały stan tych łożysk. Sugeruje to, że bez tych czynności ich stan byłby nie gorszy niż przy ich zastosowaniu. Zasadne, w tym przypadku, będzie oszacowanie zgodnie z teorią niezawodności krzywej niezawodności określającej stan tego elementu. Najczęściej spotykanym procesem starzenia podzespołów tego typu jest krzywa wannowa, która uwzględnia zwiększoną awaryjność nowych pojazdów i wzrost intensywności uszkodzeń w końcowym etapie ich użytkowania. Często używanym elementem modelującym częściowo krzywą wannową jest krzywa Weibulla. Zatem należy zastosować ten rozkład dla obliczeń.

Do uproszczonego obliczenia trwałości łożyska, zgodnie z normą DIN ISO 281 [33] zastosujemy poniższy wzór:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (3.6)$$

gdzie:

C – dynamiczna nośność łożyska,

P – obciążenie równoważne łożyska,

p – wykładnik (dla łożysk stożkowych wynosi 10/3).

Pierwotnie, biorąc pod uwagę naprawę główną P5 przy ok. 1,5 mln km, konstruktor założył L_{10} na około 0,6 mln km. Bazując na doświadczeniu eksploatacyjnym i warunkach tej eksploatacji założmy, że z analizy trwałości łożyska parametr L_{10} wynosi 1,5 mln km, jednocześnie bazując na wieloletnim doświadczeniu eksploatacyjnym przyjmijmy, że $\beta \approx 2$.

Korzystając z rozkładu Weibulla otrzymujemy:

$$R(L_{10}) = 1 - 0,10 = 0,90 = \exp \left[- \left(\frac{L_{10}}{\eta} \right)^\beta \right] = \exp \left[- \left(\frac{1,5 \text{ mln}}{\eta} \right)^2 \right]$$

$$\ln (0,90) = - \left(\frac{1,5 \text{ mln}}{\eta} \right)^2$$

stąd:

$$\eta = \frac{1,5 \text{ mln km}}{\sqrt{-\ln (0,90)}} \approx 4,62 \text{ mln km}$$

Z tego wynika krzywa niezawodności oraz można określić kiedy niezawodność spada do 70%. Na tej podstawie można zaplanować czynności utrzymaniowe, które będą nadzorowane przez system predykcyjny. Zatem ryzyko ewentualnych negatywnych zjawisk będzie zmniejszone pomimo wydłużenia okresu bezobsługowej eksploatacji łożyska. Jest to wyraźna przesłanka do zastosowania proponowanego systemu.

Transformata Fouriera. Zgodnie z definicją **Transformata Fouriera** to matematyczna operacja, która przekształca funkcję jednej zmiennej (najczęściej czasową) na funkcję częstotliwościową. Dzięki tej transformacji można przedstawić sygnał w dziedzinie częstotliwości, zamiast w dziedzinie czasu. Transformata Fouriera rozkłada funkcję na zestaw składowych sinusoidalnych. Umożliwia to znalezienie składników sinusoidalnych, czyli

pozwała zidentyfikować, jakie częstotliwości składają się na dany sygnał oraz zidentyfikować amplitudę każdego sygnału.

Dla funkcji $f(t)$, transformata Fouriera jest zdefiniowana jako [59]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (3.7)$$

gdzie:

- $F(\omega)$ – to funkcja częstotliwościowa,
- ω – to częstotliwość kątowna (w radianach na sekundę),
- $f(t)$ – to funkcja czasowa,
- $e^{-i\omega t}$ – to funkcja eksponencjalna (złożona).

Definicja ta nie jest narzędziem efektywnym do pracy na dużych zbiorach danych, jakie przewidywane są przy użyciu tej metody w analizie danych z pojazdów kolejowych on-line.

Szybka transformata Fouriera (ang. *Fast Fourier Transform*, FFT) to znacznie bardziej efektywny algorytm obliczania dyskretnej transformaty Fouriera (DFT). FFT znacząco przyspiesza ten proces, redukując liczbę operacji potrzebnych do obliczenia DFT.

Dyskretna transformata Fouriera (DFT) dla sygnału $x[n]$ o długości N jest zdefiniowana jako [59]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-i2\pi kn/N} \quad (3.8)$$

gdzie:

- $X[k]$ to współczynniki DFT (częstotliwości w sygnale),
- $x[n]$ to wartości sygnału w dziedzinie czasu,
- k to indeks częstotliwości.

Dla potrzeb badań w rozprawie, poniżej zapisano wymagania wykorzystania transformaty Fouriera do analizy drgań mechanicznych.

1. Pomiar sygnału drgań.

Czujniki takie jak akcelerometry umieszczane są na analizowanym obiekcie mechanicznym, np. na maźnicy zestawu kołowego czy ramie wózka jeźdnego. Sygnał

mierzony przez akcelerometr jest próbkowany, a jego wartości są zapisywane w regularnych odstępach czasu. Próbkowanie musi być wystarczająco szybkie, aby uchwycić wszystkie istotne częstotliwości w sygnale (zgodnie z twierdzeniem Nyquista).

2. Przygotowanie sygnału.

Stosuje się filtry, aby usunąć szumy lub nieistotne częstotliwości z sygnału przed analizą.

3. Zastosowanie transformaty Fouriera.

Za pomocą algorytmu FFT, sygnał czasowy jest przekształcany do dziedziny częstotliwości. Wynikiem tego przekształcenia jest widmo amplitudowe i widmo fazowe, które pokazują, jakie częstotliwości składają się na analizowany sygnał.

4. Analiza widma częstotliwościowego.

Analizując widmo amplitudowe, można zidentyfikować częstotliwości, które są szczególnie silne. Częstotliwości te odpowiadają częstotliwościom rezonansowym systemu, które są szczególnie istotne w kontekście bezpieczeństwa i wydajności konstrukcji.

5. Wykrywanie nieprawidłowości.

Wzorce w widmie częstotliwościowym mogą wskazywać na problemy, takie jak niewyważenie, niewspółosiowość, uszkodzone łożyska, luzy mechaniczne czy inne defekty. Na przykład pewne charakterystyczne składowe mogą wskazywać na uszkodzenia łożysk.

6. Analiza drgań niestacjonarnych.

W przypadku drgań niestacjonarnych, których występowanie w pojazdach kolejowych jest naturalne, gdzie częstotliwości zmieniają się w czasie, można zastosować bardziej zaawansowane techniki, takie jak szybka transformata Fouriera z przesuwającym oknem (STFT), które umożliwiają analizę czasowo-częstotliwościową.

7. Wizualizacja wyników.

Widma drgań. Wyniki analizy często przedstawiane są w postaci wykresów widma amplitudowego, gdzie na osi X znajduje się częstotliwość, a na osi Y – amplituda drgań. *Czasowo-częstotliwościowe wykresy.* W przypadku sygnałów niestacjonarnych, używane są wykresy czasowo-częstotliwościowe (np. spektrogramy), które pokazują, jak zmieniają się częstotliwości w czasie.

3.4. Modele symulacyjne i techniki predykcyjne

Model systemu utrzymania taboru kolejowego odwzorowuje sposób identyfikacji parametrów oraz realizacji procesów utrzymania taboru dla bezpieczeństwa i niezawodności realizowanych zadań przewozowych. Budowanie tego typu modelu wymaga podjęcia decyzji w zakresie zmienności parametrów modelu, sposobu uwzględnienia wpływu czasu i losowości zdarzeń, szczegółowości modelu, bilansowania i zachowania ciągłości realizacji zadań oraz zakresu danych zgodnie z harmonogramem przeglądów i napraw.

Budowa, adekwatnych do sytuacji decyzyjnej, modeli wymaga znajomości celu i zakresu budowy modeli [24], jakości rozwiązania – modele optymalizacyjne [46], symulacyjne [47], heurystyczne [64], stochastyczne [51], [87], charakteru zastosowania – funkcjonalne, strukturalne [76].

Mając na uwadze różne rodzaje modeli stosowanych w różnych obszarach badań oraz analizy praktycznych aspektów sytuacji decyzyjnych podstawowo wyróżnia się następujące podejścia do modelowania systemów:

1. **Modele analityczne (parametryczne)**, w których stosuje się (względnie) proste formuły matematyczne do wyznaczenia wybranych parametrów systemu, np. kosztów lub wydajności procesów. W modelach takich nie uwzględnia się wpływu czasu, chyba że czas jest parametrem formuły obliczeniowej. Najczęściej modele tego typu są implementowane w postaci arkuszy obliczeniowych i służą do podejmowania bieżących decyzji w zakresie operacyjnym [40].
2. **Modele decyzyjne (matematyczne) jednokryterialne lub wielokryterialne**, których zadaniem jest odzwierciedlenie określonych, najczęściej złożonych zjawisk w systemach lub procesach za pomocą formuł aparatu matematycznego. Dla oceny jakości rozwiązania stosuje się wskaźniki oceny tzw. funkcje kryterium. W przypadku decyzyjnych modeli wielokryterialnych, na ogół, występuje wektorowa funkcja celu złożona z wielu kryteriów cząstkowych. Oczywiście w zależności od typu zmiennych czy zapisu ograniczeń i funkcji kryterium mogą być modele liniowe, nieliniowe, statyczne, stochastyczne itp. [46], [40], [73]. Modele takie są podstawą optymalizacji procesów, także z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego [46], [41], [43].
3. **Modele symulacyjne** służą do odwzorowania, naśladowania realizacji procesów, zachowania się systemów rzeczywistych, co pozwala na odtworzenie zachowania się systemu przy pomocy języka programowania (symulacyjnego) [46], [47], [87]. Umożliwiają one zatem prowadzenie eksperymentów, zasadniczo, na rzeczywistych

systemach i procesach a także prowadzenia badań co do wpływu różnych czynników na zachowanie się parametrów związanych z badanymi systemami lub procesami. Budowa modelu symulacyjnego to złożony proces wymagający wyróżniania szeregu czynności i formalizacji cech systemu rzeczywistego oraz ustalania relacji zachodzących między tymi cechami w czasie [40].

4. **Modele cyfrowe typu cyfrowy bliźniak/cień.**

Cyfrowy bliźniak to wirtualna replika fizycznego obiektu, systemu lub procesu, która jest aktualizowana w czasie rzeczywistym na podstawie danych z rzeczywistego obiektu. Umożliwia to analizowanie i optymalizowanie rzeczywistego obiektu bazując na jego odwzorowaniu. Wykorzystuje się, w tym przypadku, technologię IoT (Internet of Things), AI (Artificial Intelligence) czy Big Data. Jest to wygodne narzędzie coraz szerzej stosowane w przemyśle [80].

5. **Modele heurystyczne** to nowoczesne podejście do rozwiązywania złożonych problemów decyzyjnych opartych o metody heurystyczne. Często w praktyce nie jest możliwe, lub nawet nie jest konieczne, uzyskanie rozwiązania optymalnego ze względu na czas obliczeń. Z tego względu często stosuje się metody pozwalające na uzyskanie rozwiązania przybliżonego. Takie narzędzia, które umożliwiają uzyskanie przybliżonego wyniku - bliskiego optimum, w krótkim czasie, są nazywane metodami heurystycznymi lub krótko heurystykami [73]. Większość z tych metod powstaje w oparciu o obserwacje otaczającego świata i funkcjonowanie organizmów żywych. Do głównych reprezentantów metod, które ostatnimi czasy stały się często stosowane, można zaliczyć między innymi sztuczne sieci neuronowe, algorytmy mrówkowe czy algorytmy genetyczne.

4. Modelowanie symulacyjne a zasady budowy modeli opartych na predykcji

4.1. Istota budowy modeli symulacyjnych

Symulacja jest praktycznym narzędziem optymalizacji umożliwiającym kompleksowe podejście do badań oraz zwiększającym pewność co do jakości projektu już we wczesnej fazie realizacji. Symulacja (komputerowa), to wytwarzanie modelu komputerowego zjawiska lub systemu, zwłaszcza do celów naukowych [65], lub inaczej odtwarzanie warunków charakterystycznych dla pewnego zjawiska, obiektu lub układu obiektów przy użyciu modelu cyfrowego, a także analiza planowanych działań z uwzględnieniem wpływu ewentualnych zmieniających się warunków [75]. Innym wskazaniem do stosowania symulacji jest brak możliwości przeprowadzenia rzeczywistego eksperymentu na istniejącym obiekcie. Zazwyczaj symulacja stosowana jest, kiedy nie można lub bardzo trudno jest uzyskać rozwiązanie analityczne danego problemu, zwłaszcza w przypadku dynamicznego i losowego zachowania się systemów czy procesów.

Symulacja komputerowa może być wykorzystana w sposób praktyczny przez użytkowników biznesowych wspieranych przez specjalistów w zakresie symulacji. Popularność uniwersalnych środowisk symulacyjnych determinowana jest wysokim, rosnącym poziomem kodów czy algorytmów upraszczających proces symulacji. Ponadto, ze względu na możliwość wykorzystania zaawansowanej wizualizacji i raportowania staje się preferowanym sposobem identyfikacji wąskich gardeł i miejsc ograniczających wydajność (*efficiency leakage areas*) dla dużej grupy odbiorców. Symulacja systemów, w tym systemów utrzymania taboru kolejowego ma zastosowanie do:

- testowania wpływu względnie niewielkich zmian w bieżącym stanie systemu na jego efektywność, zdolność do realizacji zwiększonych zadań,
- badania układów technologicznych na aktualne i przyszłe zapotrzebowanie zadań,
- badania układów technologicznych na zakłócenia, badania zachowania układu/systemu wobec różnych wymuszeń czy zakłóceń,
- szacowanie wydajności, efektywności zaprojektowanych lub modernizowanych ciągów technologicznych systemu utrzymania taboru na różne typy zakłócenia,
- badania możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do sterowania procesem systemu.

Modele symulacyjne mogą być również wykorzystywane do testowania różnych scenariuszy pracy systemów utrzymania taboru kolejowego. Główne zalety symulacji komputerowej w porównaniu z innymi narzędziami wynikają z ([6], [47], [87]):

- elastyczności modeli symulacyjnych i łatwości wprowadzania zmian, w tym również skalowania systemu,
- bardziej dogodnego uwzględniania losowości zaistniałych zdarzeń,
- niższych kosztów przygotowania w porównaniu do innych badań,
- wiarygodności wyników (w przypadku poprawnej weryfikacji i walidacji modelu),
- możliwości uwzględnienia nie tylko różnych warunków początkowych ale również różnego rodzaju zakłóceń, w tym kryzysowych,
- powtarzalności eksperymentów,
- krótkiego czasu symulacji przy dzisiejszym potencjale komputerów.

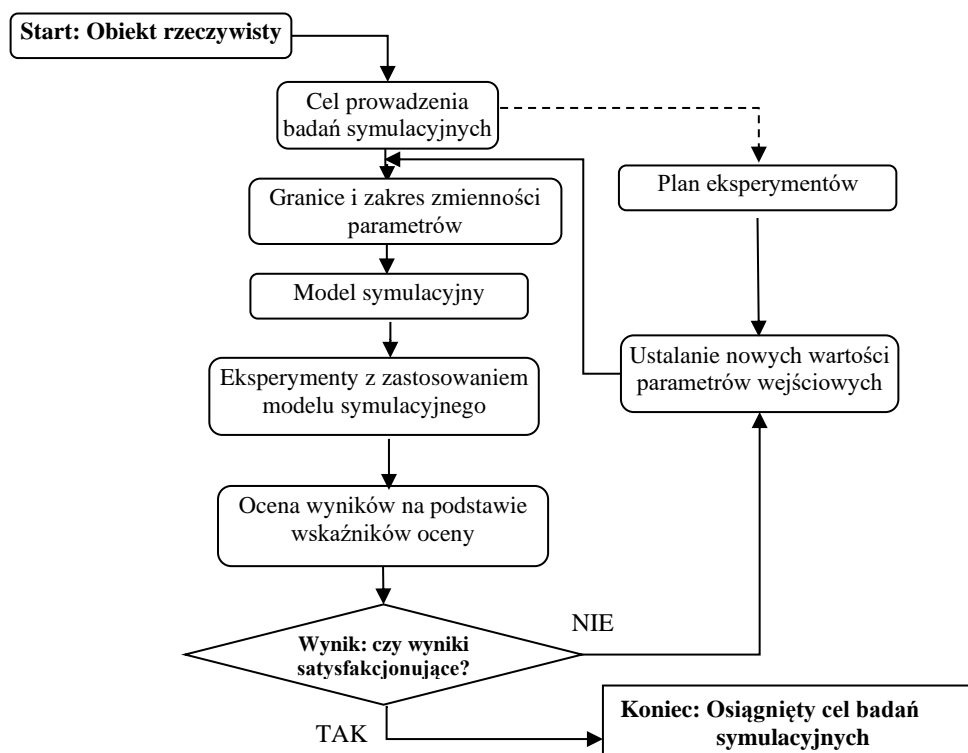
Biorąc pod uwagę powyższe, można uznać, że modele symulacyjne stają się efektywnym narzędziem badania różnych systemów czy procesów. Z tego względu wypracowywane schematy i zasady budowy modeli symulacyjnych mogą, z powodzeniem, być użyte na potrzeby badania systemów utrzymania taboru kolejowego ([13], [66], [9]). Ponieważ badanie symulacyjne danego systemu czy procesu polega na obserwacji reakcji modelu symulacyjnego na zmiany wartości jego parametrów, to celem badania jest dobranie takiego układu wartości parametrów, dla którego reakcja systemu jest najbardziej korzystna z punktu widzenia przyjętych kryteriów [87]. Można zatem przyjąć, że prowadzenie badań symulacyjnych jest podobne do poszukiwania rozwiązań optymalnych w modelach analitycznych. Wynikiem działania symulacji jest zapis przebiegu procesu np. w postaci szeregu zdarzeń, który może być wizualizowany lub wykorzystany do wyznaczania wartości wybranych wskaźników oceny [22], [47], [66].

Jak wskazują badania literaturowe [57], [50] podstawą badań symulacyjnych jest określenie celu badań, w tym:

- ustalenie właściwości (parametrów) obiektu, które będą miały wpływ na funkcjonowanie prognozowanego zjawiska, systemu,
- ustalenie zakresu zmian (właściwości) parametrów funkcjonowania/działania obiektu,
- określenie sposobu oceny wpływu zmian właściwości na funkcjonowanie obiektu w przyszłości,
- ustalenie wskaźników oceny przeprowadzonych eksperymentów wskazujące na stopień osiągnięcia celu badań,

- ustalenie zakresu dokładności uzyskiwanych wyników danego środowiska symulacyjnego umożliwiającego odwzorowanie badanych operacji, zdarzeń oraz prowadzenie eksperymentów symulacyjnych,
- ustalenie eksperymentatora zdolnego do planowania, kontroli oraz modyfikacji przebiegu symulacji.

Na ogół, badania symulacyjne przebiegają wg założonego schematu Rys. 4.1

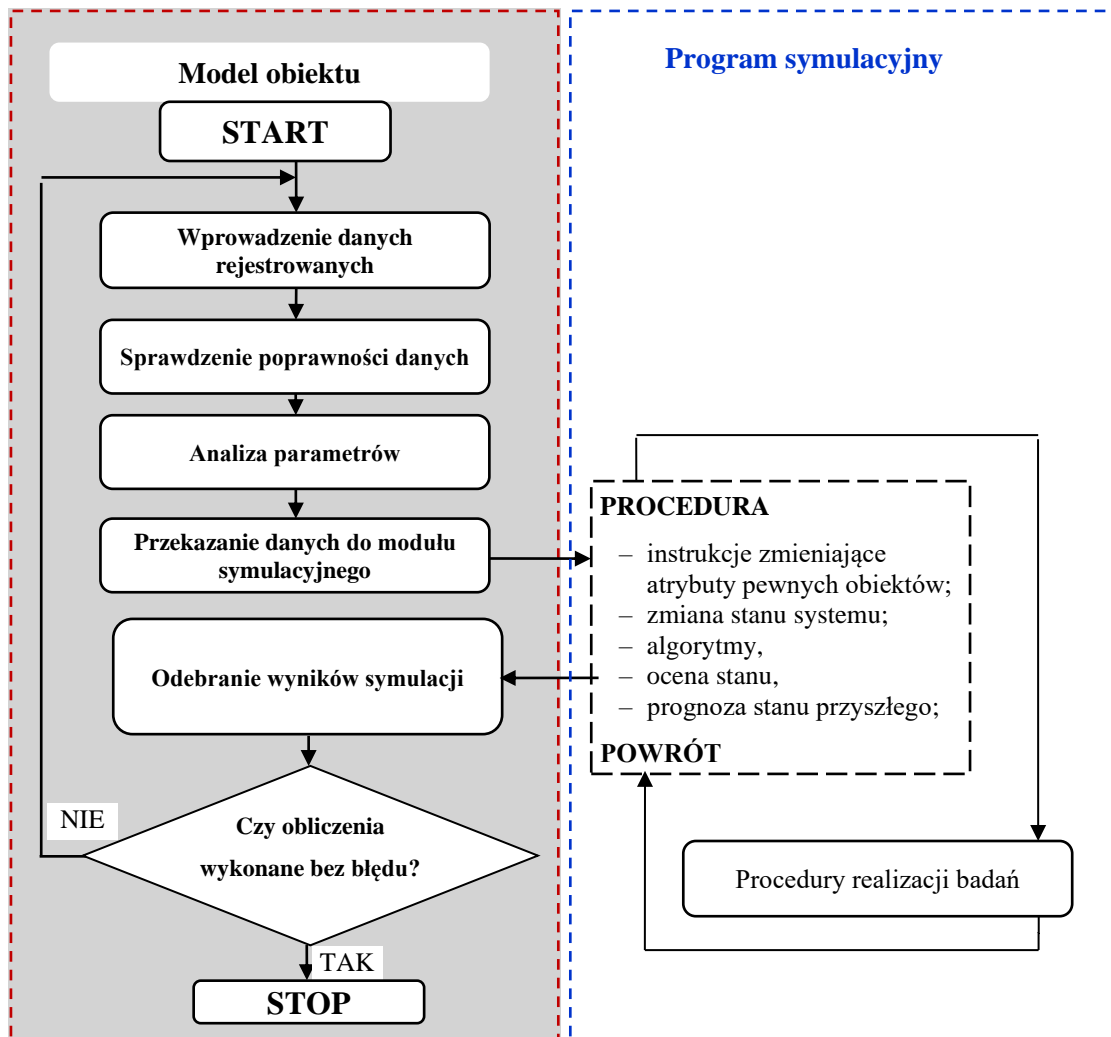


Rys. 4.1. Schemat realizacji eksperymentu w rozprawie doktorskiej.

Źródło: opracowanie własne

Podczas budowy modelu symulacyjnego niezbędne jest również odwzorowanie zasobów systemu, w tym urządzeń, pracowników, sposobu zbierania danych statystycznych, algorytmów decyzyjnych do wyznaczania trajektorii przejścia przez poszczególne elementy systemu oraz mechanizmów wykrywania i naprawiania błędów.

Sam proces symulacji można z kolei przedstawić jako uporządkowany ciąg zdarzeń, przy czym każde wystąpienie zdarzenia ma swój dokładny, zaplanowany wcześniej czas wyrażony w jednostkach czasu symulacyjnego. Obliczenia symulacyjne są prowadzone w strukturze szeregowej i są powtarzane cyklicznie, aż do uzyskania wartości oczekiwanej. Uzyskanie wartości oczekiwanej kończy całą procedurę symulacji. Strukturę i organizację systemu dla symulacji danego zjawiska można przedstawić jak na rys. 4.2



Rys. 4.2. Struktura i organizacja systemu symulacji
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [57]

4.2. Etapy budowy symulacyjnego modelu predykcyjnego

Zmiany zachodzące w dostępie do informacji oraz zderzenie się z dużą ilością danych tj. w erze tzw. „big data”, coraz częściej poszukuje się metod, które umożliwią przewidywanie przyszłych zdarzeń. Jednym z kluczowych elementów współczesnej analizy danych jest modelowanie predykcyjne. Modelowanie predykcyjne pozwala przewidywać przyszłe zdarzenia na podstawie analizy przeszłych i teraźniejszych danych.

Modelowanie predykcyjne jest procesem wykorzystywania statystycznych technik oraz algorytmów uczenia maszynowego (machine learning) do prognozowania przyszłych wyników. Opiera się na analizie wzorców i trendów w danych historycznych, co umożliwia tworzenie prognoz, które mogą być niezwykle dokładne i wartościowe w procesie podejmowania decyzji.

Jak już zostało wspomniane w rozdziale 2, modelowanie predykcyjne to proces, w którym przewiduje się wyniki, trendy, czy występowanie zdarzeń na podstawie danych historycznych. Do budowy modelu predykcyjnego wykorzystuje się dane historyczne, a następnie po tzw. „wytrenowaniu” modelu, można dokonywać analiz prognostycznych, co do zdarzeń w przyszłości.

Najprostszym przykładem modelu predykcyjnego jest regresja liniowa, która pomimo prostoty jest często wykorzystywana w różnych zagadnieniach. W praktyce inżynierskiej coraz częściej poszukuje się narzędzi, które w szybkim czasie umożliwią ocenę stanu zdolności danego urządzenia na podstawie wybranych parametrów. Dlatego jednym z wyzwań jest przetwarzanie ogromnych ilości danych np. z czujników pomiarowych. Oprócz technicznych aspektów przechowywania i bezpieczeństwa dużych zbiorów danych, wyzwaniem jest również ich analiza. Metody modelowania predykcyjnego doskonale sprawdzają się w tym zagadnieniu.

Analizując dane historyczne z czujników, dokumentacji utrzymania sprzętu i konserwacji, modele predykcyjne przewidują, kiedy instalacja lub urządzenie prawdopodobnie ulegnie awarii. Takie prognozy umożliwiają odpowiednie czynności utrzymaniowe, zapobiegając niespodziewanym awariom i redukując przestoje w produkcji. Metoda ta, w literaturze przedmiotu, nazywana jest predykcyjnym utrzymaniem ruchu (prognostics maintenance) [12], [3].

Modele predykcyjne mogą być wykorzystywane w bardzo wielu dziedzinach techniki, a także gospodarki. Modele predykcyjne np. pomagają producentom w przewidywaniu wahań popytu poprzez analizę historycznych danych sprzedażowych, sezonowości i trendów rynkowych. Dzięki tej wiedzy producenci mogą optymalizować poziomy zapasów, harmonogramy produkcji i alokację zasobów.

Producenci mogą identyfikować i rozwiązywać problemy z jakością, zanim przerodzą się one w poważniejsze problemy. Modele uczenia maszynowego wykrywają anomalie, odchylenia lub wzorce wskazujące na potencjalne wady poprzez analizę danych w czasie rzeczywistym z linii produkcyjnych. Wczesne wykrywanie pozwala na podjęcie działań, zmniejszając liczbę produktów niespełniających wymagań jakościowych.

Optymalizacja procesów ma wiele zalet, między innymi zwiększenie wydajności produkcji, zmniejszenie energochłonności procesu, poprawę jakości produktów, czy zmniejszenie szybkości zużycia aparatury. W przemyśle wytwórczym zapotrzebowanie na optymalizację procesów rośnie, ponieważ pozwala na minimalizację wykorzystania zasobów, czasu i pracy.

Optymalizacja procesów oparta na technikach modelowania predykcyjnego rewolucjonizuje sposób funkcjonowania nowoczesnych zakładów produkcyjnych. W tradycyjnym podejściu,

technologowie przeprowadzają optymalizację na podstawie swojego doświadczenia i długotrwałych obserwacji. Ten czasochłonny proces można uprościć dzięki technikom modelowania predykcyjnego. Poprzez wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego wyznaczenie optymalnych warunków pracy jest znacznie łatwiejsze, umożliwiając nie tylko szybsze ale i dokładniejsze dostosowanie procesów produkcyjnych do zmieniających się warunków.

Na podstawie literatury i badań [57], poszczególne kroki postępowania przy procesie modelowania predykcyjnego można zapisać następująco:

ETAP 1: *Identyfikacja kluczowych procesów i celów modelu*

Pierwszym krokiem modelowania predykcyjnego jest identyfikacja kluczowych procesów i ich parametrów technicznych, wyznaczenie najważniejszych elementów do optymalizacji i związanych z nimi krytycznych problemów do rozwiązania. Problemy te mogą dotyczyć m.in.: konkretnych podzespołów i ich awarii, nadmiernego zużycia, niskiej efektywności energetycznej, opóźnień, monitorowania parametrów procesu itp. W przypadku predykcji procesu utrzymania, szczególny nacisk należy położyć na parametry krytyczne, które bezpośrednio wpływają na bezpieczeństwo eksploatacji i niezawodność taboru.

ETAP 2: *Wybór narzędzi i technologii oraz wstępna agregacja danych*

Na podstawie zidentyfikowanych problemów i obszarów do analizy należy dokonać wyboru odpowiednich narzędzi i technologii do modelowania predykcyjnego. W ramach tego etapu określone są źródła czy metody zbierania danych. Dokonywana jest analiza danych historycznych i bieżących z elementów badanych (np. temperatury, ciśnienia, wibracji, czasu pracy), a następnie dokonywana jest ocena ich jakości, spójności i przydatności. Przygotowanie i obrobienie danych powinno pozwolić na wykorzystanie ich do analizy odpowiedniego algorytmu. Wstępna analiza musi także uwzględnić specyfikę obszarów danych w zależności od ich źródeł. W przypadku utrzymania taboru dane pochodzą z czujników i systemów diagnostycznych zamontowanych na pojazdach, takich jak rejestratory drgań, temperatury czy prądów. Niezbędna jest integracja tych danych z systemami już istniejącymi.

ETAP 3: *Ustalenie zespołu ekspertów i analityków*

Kolejny etap w modelowaniu predykcyjnym, to ustalenie interdyscyplinarnego zespołu ekspertów z danej dziedziny i analityków danych oraz specjalistów w zakresie wykorzystania technologii zastosowanych w modelu predykcyjnym. Niezbędne jest także wsparcie zespołu analityków, odpowiedzialnego za wdrożenie i zarządzanie modelami predykcyjnymi. Zespół powinien zawierać także ekspertów i analityków kompetentnych w interpretacji wyników oraz optymalizacji procesów. Istotny jest podział ról w zespole: analiza danych, budowa modeli, testowanie oraz wdrażanie.

Zespoły powinny współpracować, aby zapewnić zarówno techniczne, jak i praktyczne wykorzystanie modeli. W badanym w rozprawie przypadku, zespół powinien obejmować inżynierów specjalizujących się w pojazdach szynowych oraz analityków danych zajmujących się interpretacją trendów i prognoz.

ETAP 4: *Budowanie właściwego modelu predykcyjnego*

W tym etapie, budowany jest adekwatny do sytuacji decyzyjnej model predykcyjny. Niezbędne jest opracowanie odpowiednich warunków brzegowych, ustalenie zakresu zmienności parametrów, tolerancji, progów ostrzegawczych dla kluczowych procesów i podzespołów itp. Algorytmy oraz metody modeli dobierane, budowane i testowane są na podstawie dostępnych danych historycznych. W zależności od stosowanych elementów stosuje się odpowiednie techniki uczenia maszynowego i analizy danych, w tym testowanie różnych algorytmów i wybór, najlepiej generalizującego obiekt rzeczywisty, modelu. W trakcie kalibracji modelu należy zachować iteracyjny proces uczenia i jego walidacji. Na tym etapie należy monitorować wydajność modeli, dostosowując je do specyficznych potrzeb badań. Ponadto prowadzi się uczenie modelu tak, aby np. sieć neuronowa prawidłowo dobrała współczynniki każdego elementu. Trening może być prowadzony na kilku różnych odmianach, przy czym ostatecznie powinna być wybrana wersja, która posiada najlepsze zdolności generalizacyjne obiektu oryginalnego. Dla rozpatrywanego, w badanym w rozprawie przypadku modelu, algorytmy powinny być przystosowane do przewidywania zarówno krótkoterminowych procesów występujących w taborze jak i długoterminowego zużycia elementów pojazdu czyli powinny uwzględniać specyfikę taboru.

ETAP 5: *Testowanie i generowanie raportów oraz szacowanie skuteczności*

Po zbudowaniu modelu, należy przeprowadzić analizę i testowanie na wybranych danych. Głównym założeniem tego etapu jest testowanie wybranego modelu na

nieznanych danych testowych i określanie jego skuteczności działania. Testowanie powinno umożliwić ocenę efektywności modeli, identyfikację potencjalnych problemów i dostosowanie algorytmów. Następuje także symulacja scenariuszy awaryjnych i optymalizacyjnych w celu sprawdzenia, czy model działa zgodnie z oczekiwaniami. Po fazie testowania, wprowadzane są konieczne poprawki dla zapewnienia działania modelu zgodnie z założeniami. W przypadku modelu utrzymania taboru, szczególną uwagę należy zwrócić na zdolność modelu do prognozowania krytycznych awarii wymagających natychmiastowej reakcji.

ETAP 6: *Skalowanie modelu i analiza wyników oraz ocena jego integracji z rzeczywistymi modelami*

Po zakończeniu testów, należy zająć się skalowaniem rozwiązania i integracją modeli predykcyjnych z procesami badanego obszaru. Wdrożenie modeli na szerszą skalę czyli dostosowanie modelu do obsługi większej liczby urządzeń oraz zapewnienie, że model może działać w czasie rzeczywistym. Ważnym elementem jest także zapewnienie pełnej integracji modelu z istniejącymi już systemami. W tym etapie wdrożenia modelu jest monitorowanie jego skuteczności w rzeczywistych warunkach pracy. Daje to informację zwrotną dla dostosowania modelu w oparciu o analizy celem zwiększenia efektywności i dokładności. Należy także pamiętać o okresowym „retrenowaniu” modelu. Jednocześnie w przypadku utrzymania taboru istotne są powiadomienia i automatyczne przesyłanie do systemów zarządzania konserwacją w celu optymalnego zaplanowania działań

ETAP 7: *Wdrożenie modelu do praktyki na szerszą skalę*

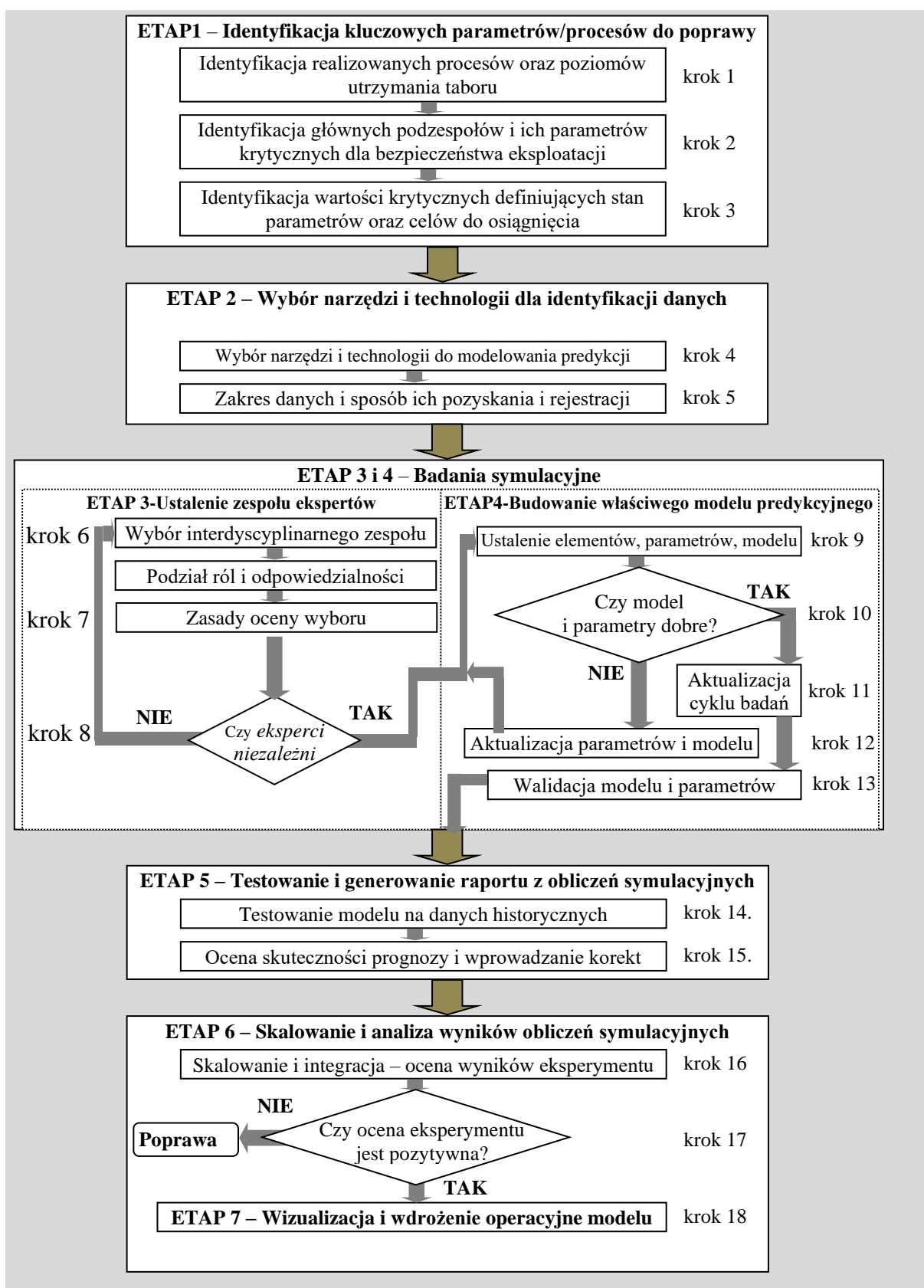
Etap ten polega na wdrożeniu modelu do oceny procesów, parametrów wymagających bieżącego monitorowania. Na tym etapie ważne jest przygotowanie intuicyjnych wizualizacji wyników modelu, np. wykresów trendów, prognoz czy raportów umożliwiającym wykorzystanie modelu do pracy zespołów operacyjnych. W tym etapie, następuje również udostępnienie wyników zarówno zespołom operacyjnym jak i decyzyjnym w sposób, który wspiera ich działania i optymalizuje procesy utrzymania. Dla utrzymania taboru istotne są odpowiednie wizualizacje przedstawiające prognozy dotyczące prawdopodobieństwa określonej awarii oraz sugerowane harmonogramy utrzymania dla całej floty. Raporty powinny być dostosowane zarówno dla operatorów (proste alerty), jak i dla kadry zarządzającej (szczegółowe analizy trendów).

W przypadku modeli predykcyjnych służących do utrzymania taboru kolejowego, należy uwzględnić następujące zalecenia istotne z tego punktu widzenia niezawodności, efektywności i bezpieczeństwa działania systemu utrzymania:

- **Większy nacisk na integrację z systemami technicznymi pojazdu i obsługi taboru**, np. czujnikami i systemami monitorującymi, co jest kluczowe w urządzeniach transportowych.
- **Iteracyjny charakter procesu** – wprowadzono cykle uczenia, testowania i doskonalenia modelu.
- **Skalowalność i integracja** – model dostosowany do pracy z szeregiem różnych podzespołów i urządzeń a także uwzględniających istniejące cykle utrzymania całej floty pojazdów.
- **Dostosowanie do praktyki inżynierskiej** – konieczne jest uwzględnienie roli zespołów technicznych i specyfiki transportowych urządzeń technicznych.

Na rys. 4.3 przedstawiony został opisany proces tworzenia symulacyjnego systemu predykcyjnego z uwzględnieniem elementów charakterystycznych dla utrzymania taboru kolejowego. Konkretyzacja modelu wykonywana jest w trakcie badań symulacyjnych w momencie, kiedy wyniki zgodnie z oceną nie potwierdzają poprawności modelu. Zmiany przygotowane przez interdyscyplinarny zespół ekspertów powinny być adekwatne do wyników symulacji przygotowanego modelu. Weryfikacji i korekcie poddawany jest zarówno zestaw danych jak też sam model, w zależności od oceny wyników symulacji.

Modelowanie predykcyjne choć napotyka na pewne wyzwania i ograniczenia, jego potencjał do przewidywania przyszłych zdarzeń i optymalizacji procesów jest nieoceniony. Zastosowanie odpowiednich metod i technik może przyczynić się do poprawy wyników kosztowych, lepszej i efektywniejszej obsługi, podniesienia poziomu bezpieczeństwa eksploatacji oraz rozwoju innowacyjnych produktów i usług. Ponadto, pozwala ono na prognozowanie przyszłych wyników, szacowanie ryzyka, ocenę sytuacji czy zarządzanie zasobami, czasem oraz finansami. Kluczowym aspektem jest optymalne dobranie zarówno elementów systemu predykcyjnego, danych przeznaczonych do zasilania modelu, struktury samego modelu oraz metod wykorzystywanych w modelu. Optymalne przygotowanie i realizacja tych elementów modelu zwiększa znacznie prawdopodobieństwo jego skuteczności.



Rys. 4.3. Powiązania między kolejnymi etapami procedury badań symulacyjnych dla potrzeb utrzymania taboru kolejowego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [46]

Niestety, pomimo, że modelowanie predykcyjne ma ogromny potencjał, to napotyka na wiele wyzwań i ograniczeń wynikających z [73], [57]:

- **jakości danych** - modele predykcyjne są tak dobre, jak dane, na których są uczone. Przekłamania w danych mogą prowadzić do błędnych prognoz,
- **ograniczeń w reprezentacji rzeczywistości** – symulacje upraszczają rzeczywiste procesy, co może prowadzić do pominięcia istotnych zależności, nieliniowości lub dynamicznych zmian,
- **braku interpretowalności** - niektóre zaawansowane algorytmy, takie jak sieci neuronowe, są trudne do interpretacji i mogą działać jak „czarne skrzynki”,
- **trudności w skalowaniu** – modele symulacyjne mogą być trudne do skalowania na większe systemy lub bardziej złożone scenariusze,
- **złożoności obliczeniowej**- modele predykcyjne, zwłaszcza te oparte na dużych zbiorach danych, mogą wymagać znacznych zasobów obliczeniowych.
- **overfittingu** - model może być nadmiernie dopasowany do historycznych danych, co prowadzi do słabej generalizacji na nowych danych,
- **czasochłonnego projektowania i kalibracji** – budowa, kalibracja i walidacja modelu symulacyjnego wymaga znacznego nakładu czasu, wiedzy eksperckiej i iteracyjnych poprawek, co zwiększa koszty i opóźnia wdrożenie takiego systemu.

Wśród metod modelowania predykcyjnego można wyróżnić m.in. [73], [57], [4]:

- regresję liniową, która stanowi najprostszy model statystyczny opisujący zależność między zmiennymi za pomocą prostej linii,
- drzewa decyzyjne, dane i decyzje przedstawiane są w formie drzewa, gdzie wierzchołki (węzły) reprezentują decyzje, a połączenia (tzw. liście) końcówki prognostyczne. Odmianą są metody zwane *lasem losowym*, które stanowią modele uczące się na podstawie wielu drzew decyzyjnych, zwiększając tym samym dokładność i stabilność prognoz,
- sieci neuronowe, to algorytmy maszynowego uczenia inspirowane strukturą i funkcjonowaniem mózgu, używane do rozpoznawania wzorców i klasyfikacji,
- modelowanie probabilistyczne, wykorzystują prawdopodobieństwo do przewidywania zdarzeń na podstawie istniejących danych, modele Markowa stosują łańcuchy zdarzeń do modelowania procesów dynamicznych
- metody klastrowania, grupują dane w kalstry na podstawie prawdopodobieństwa, co umożliwia wykrycie wzorców lub nietypowych zachowań,

- analiza skupień, metoda polegająca na grupowaniu danych w klastry na podstawie podobieństw, wykorzystywana m.in. w analizie rynku.

4.3. Możliwości i wyzwania dla zastosowania sztucznych sieci neuronowych w modelach predykcji

Sieci neuronowe są to sztuczne struktury o budowie i zasadzie działania opartej na modelu naturalnego układu nerwowego, a dokładniej mózgu. Mają zastosowanie w wielu dziedzinach życia do rozwiązywania problemów, w których użycie innych metod jest trudne lub niemożliwe. Stosuje się je w fizyce, analizie obrazów, geologii, ekonomii czy w wojskowości. Sieci neuronowe pozwalają na rozwiązywanie problemów, dla których nie ma modeli matematycznych. Jest to główna cecha, która wpłynęła na bardzo dużą popularność tych metod.

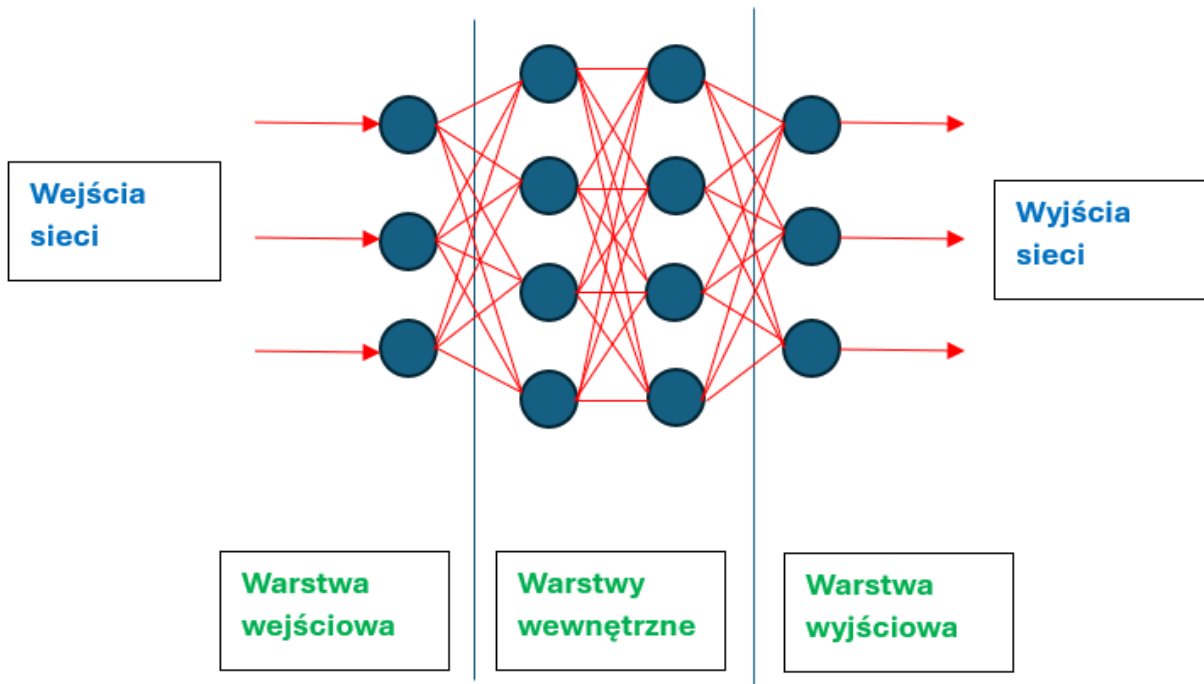
Sieci neuronowe składają się z trzech głównych warstw:

- a) warstwy wejściowej, która odbiera dane wejściowe;
- b) warstw ukrytych, które przetwarzają dane i wydobywają z nich wzorce;
- c) warstwy wyjściowej, która generuje wynik na podstawie przetworzonych danych.

Każda warstwa sieci zawiera neurony połączone za pomocą wag, które określają siłę oddziaływania między neuronami. Kluczowym elementem funkcjonowania sieci neuronowych jest proces optymalizacji wag podczas uczenia, tak aby minimalizować różnicę między oczekiwanym wynikiem a rzeczywistym. Sieci neuronowe mogą przyjmować różne formy, takie jak sieci feedforward (bezpółłączeniowe), w których sygnał przechodzi w jednym kierunku, czy rekurencyjne sieci neuronowe (RNN), które uwzględniają zależności czasowe. Inne popularne odmiany to konwolucyjne sieci neuronowe (CNN), wykorzystywane głównie w analizie obrazów, oraz głębokie sieci neuronowe (DNN), które zawierają wiele warstw ukrytych, umożliwiających analizę złożonych danych.

Większość sieci wykorzystuje sprzężenie zwrotne w procesie uczenia sieci. Sprzężenie zwrotne to mechanizm, w którym wynik działania sieci (wartość wyjściowa) jest porównywany z wartością oczekiwaną (np. etykietą w procesie uczenia z nadzorem). Na tej podstawie obliczana jest funkcja błędu (np. różnica między wynikiem a celem). W procesie uczenia, algorytm wstecznej propagacji błędu dostosowuje wagi połączeń neuronów, aby zminimalizować błąd.

Uproszczoną strukturę sieci neuronowej przedstawiono na rys 4.4.



Rys. 4.4 Przykładowa ogólna struktura sieci neuronowej

Źródło: opracowanie własne

Uczenie i stosowanie sieci wymaga postępowania według etapów. W przygotowaniu sieci do pracy można wyróżnić główne elementy. Pierwszym jest zbieranie danych, projekt sieci oraz uczenie sieci, w którym na podstawie danych empirycznych określana jest reakcja na zadany bodziec. Po przeprowadzeniu pierwszego etapu (trening) można przejść do pracy z siecią, podając na jej wejścia dowolne sygnały. Sieć nauczona na pewnym zbiorze danych daje wyniki dla danych, które nie brały udziału w procesie uczenia. Są to cechy uzyskane w oparciu o obserwacje pracy mózgu. Dzięki badaniom nad budową i pracą systemu nerwowego oraz przeniesieniu zaobserwowanych mechanizmów do budowy modeli matematycznych, powstało użyteczne narzędzie, które ma zastosowanie do wielu problemów praktycznych.

Najważniejszymi zaletami sieci neuronowych są:

- *adaptacyjność*: sieci uczą się na podstawie danych, co pozwala im dostosowywać się do nowych sytuacji bez konieczności ręcznego programowania,
- *zdolność do pracy z dużymi zbiorami danych*: sieci neuronowe radzą sobie z przetwarzaniem dużych ilości danych, co jest kluczowe w dzisiejszych zastosowaniach big data,
- *rozpoznawanie wzorców*: sieci neuronowe doskonale identyfikują ukryte wzorce w danych, nawet jeśli są one bardzo skomplikowane lub zaszumione,

- *wszechstronność*: sieci mogą być stosowane w wielu dziedzinach, takich jak analiza obrazów, przetwarzanie języka naturalnego czy prognozowanie czasowe,
- *brak konieczności dokładnego modelowania*: sieci neuronowe mogą działać nawet w przypadku braku precyzyjnego modelu matematycznego opisującego problem.

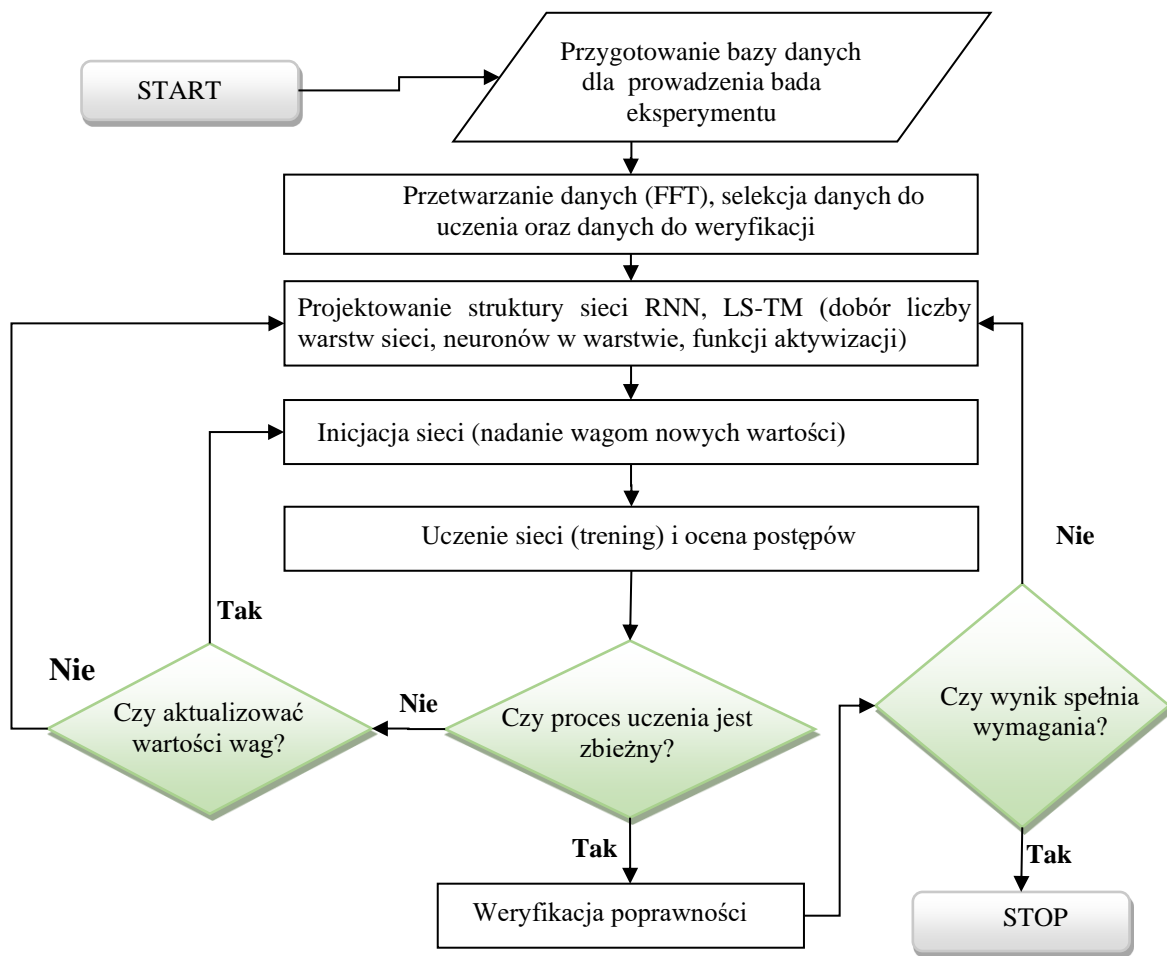
Zastosowanie rozwiązania bazującego na sieci neuronowej niesie ze sobą także określone wyzwania. Najistotniejsze zagadnienia do rozwiązania to:

- *wymagania obliczeniowe*: proces trenowania sieci, zwłaszcza głębokich, wymaga dużej mocy obliczeniowej i może być czasochłonny,
- *brak interpretowalności działania*: sieci neuronowe działają jak "czarna skrzynka", co utrudnia zrozumienie, jak dokładnie podejmowane są decyzje na podstawie danych wejściowych.

W przypadku użycia sieci do analizy sygnałów drgań rejestrowanych z akcelerometrów pojazdu, prawidłowym wyborem będzie zastosowanie sieci neuronowej opartej na uczeniu nienadzorowanym do detekcji anomalii, a także zastosowanie dodatkowych warstw do analizy trendów. W takim przypadku należy wykorzystać autoenkoder (rodzaj sieci neuronowej, która uczy się reprezentacji danych wejściowych w postaci zakodowanej), dobrze eliminującej szumy w połączeniu z rekurencyjną siecią neuronową (RNN), do analizy danych sekwencyjnych z czujników drgań bezpośrednio lub też z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT).

Proces treningu sieci bazował będzie na prawidłowych drganiach, aż do prawidłowej walidacji nauczonej sieci wskazujący czy rozpoznaje ona drgania prawidłowe i zawierające anomalie (np. sztucznie wprowadzone), tak aby określić granicę błędu. Dla analizy trendów zmian sygnału zastosowane zostaną dodatkowe warstwy rekurencyjne sieci np. typu LSTM (Long Short-Term Memory) dobrze rozpoznające długoterminowe zmiany. Taka ogólnie zdefiniowana sieć neuronowa po okresie treningu będzie efektywnym narzędziem rozpoznawania anomalii i trendów.

Schemat postępowania przy implementowaniu i testowaniu tworzonej sieci neuronowej przedstawiono na rys 4.5.



Rys. 4.5. Schemat postępowania przy stosowaniu sieci neuronowych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [45]

5. Wymagania funkcjonalne budowy systemu utrzymania taboru kolejowego opartego na modelu predykcyjnym

5.1. Uwagi ogólne

Założenia modelu, jakkolwiek ogólne, aby ich poprawność obiektywnie ocenić, referować powinny do rzeczywistych parametrów, które będą kluczowym elementem jego funkcjonowania i dla których jest on tworzony. Proponowany model bazuje na powszechnie stosowanym planowo-zapobiegawczym systemie utrzymania, który wymaga realizacji określonych czynności na określonym poziomie przeglądu.

Autor rozprawy założył, że model ten będzie zawierał istotne uzupełnienie w postaci elementów systemu parametrycznego pozwalającego na istotną zmianę planu utrzymania dla niektórych elementów na system predykcyjny. Oznacza to, że system parametryczny, bazujący na określonych parametrach podzespołów pojazdu, będzie wskazywał prawidłowość stanu danego podzespołu, a to z kolei będzie stanowiło podstawę do predykcji czynności utrzymaniowych dla danego podzespołu na tym pojeździe.

Pewien zakres czynności, niezależnie od zmiany całości systemu będzie pozostawał niezmienny. Niezmiennie pozostaną czynności wymagające konkretnych wymian i uzupełnień materiałów, a najistotniejsze zmiany dotyczyć będą czynności oceny stanu podzespołów, które stanowią najważniejsze kryterium zdatności konkretnego pojazdu do eksploatacji. Przedstawione zatem będą cechy systemu parametrycznego wraz z określonymi parametrami oraz zakresami ich występowania. Ponadto będą przedstawione ograniczenia takiego systemu, tj. czynności, które niezależnie od oceny stanu powinny być cyklicznie wykonywane.

Schemat systemu utrzymania taboru kolejowego z uwzględnieniem modułu oceny parametrów pracy taboru oraz modułu predykcyjnego zostanie przedstawiony szczegółowo w rozdziale 6. Moduły pojazdu rejestrują odpowiednie parametry techniczne z sensorów umieszczonych na pojeździe i przesyłają je do modułu oceny tych parametrów. W tym etapie monitorowana jest praca poszczególnych podzespołów taboru w trybie on-line. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości granicznych następuje włączenie alarmu w planowo-zapobiegawczym systemie utrzymania i wprowadzane są czynności zmierzające do mitygacji wartości tych parametrów.

Na podstawie wprowadzonych do systemu parametrów ocenia się jego efektywność pracy. Praca systemu jest rejestrowana, a parametry i jego stan jest zapisywany w bazie danych. Kluczowym modułem w prognozowaniu stanu systemu utrzymania taboru jest moduł

predykcyjny. Na podstawie danych zebranych w module analitycznym i oceny parametrów technicznych opracowywany jest prognostyczny model stanu systemu zgodnie z przyjętą metodą prognozy. Efektem końcowym jest opracowanie kompleksowych wskaźników oceny w postaci funkcyjnej zależności określającej stan systemu oraz raport prognozowanych parametrów technicznych taboru.

5.2. Wymagania prawne i organizacyjne systemu utrzymania taboru metra

Zgodnie z wymaganiami prawnymi opisanymi w rozdziale 1.3 utrzymanie każdego taboru kolejowego w Polsce wymaga realizacji zapisów załącznika nr 3 do rozporządzenia z 12 października 2005 [70]. W praktyce oznacza to stworzenie planu przeglądów i napraw oraz stosownych technologii ich wykonywania. Istotną regułą jest absolutny zakaz przekroczenia zapisanych, dla danego poziomu utrzymania konkretnego typu taboru, parametrów czasowych i kilometrowych zdefiniowanych przez producenta taboru. Reguła mówi, że do chwili wykonania przeglądu poziomu wyższego wykonuje się wszystkie przeglądy poziomu niższego (rys.5.1).



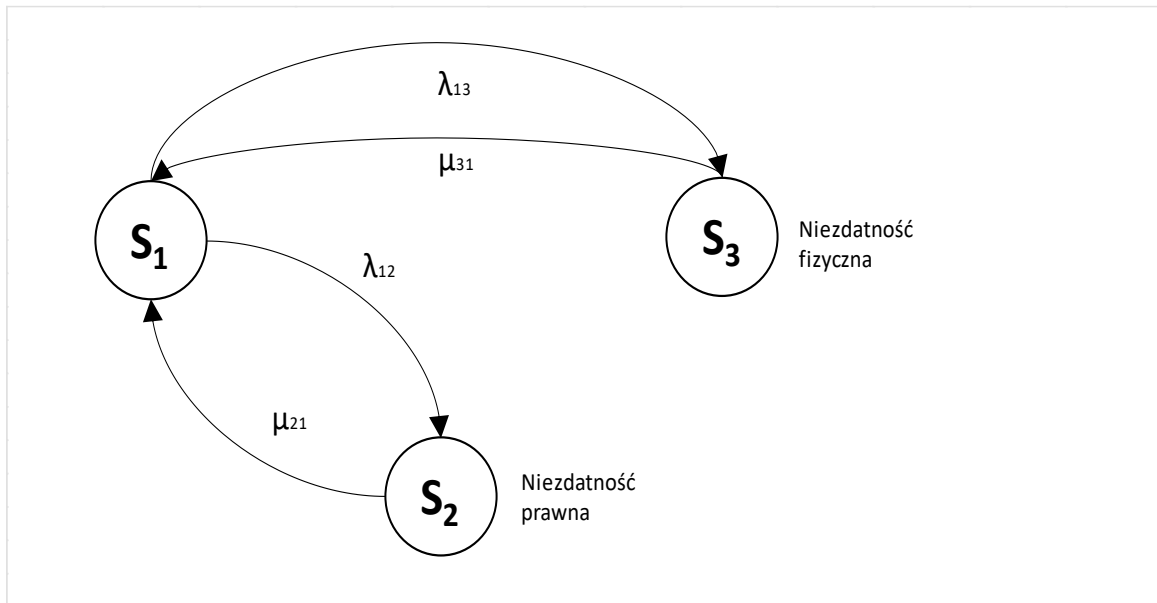
Rys. 5.1. Uproszczony schemat utrzymania taboru – cykl utrzymaniowy

źródło: opracowanie własne.

Rys. 5.1 zawiera schemat uproszczony klasycznego procesu utrzymania. Jak wskazano na schemacie, każdy poziom utrzymania występuje w kolejności chronologicznej, przy założeniu wykonywania czynności z każdego poziomu bez przekroczenia określonego dla niego czasu lub przebiegu kilometrowego. Ten właśnie proces będzie reorganizowany w wyniku wartości otrzymywanych przez pojazdowy system parametryczny dający ocenę predykcyjną, co do konieczności wykonywania określonych czynności na danym poziomie utrzymania. Konsekwencją takiej zmiany będzie zmiana większości procesów utrzymaniowych oraz zmiana Dokumentacji Systemu Utrzymania (DSU), będącej najważniejszym dokumentem definiującym procesy utrzymaniowe każdego elementu pojazdu kolejowego.

System predykcyjny jest elementem, który będzie umożliwiał rezygnację z czynności utrzymaniowych pojazdu dla części modułów na określonych poziomach przeglądów, lub też będzie umożliwiał przesunięcie tych czynności na wyższe poziomy przeglądów i napraw.

Rys. 5.2. przedstawia schematycznie proces eksploatacji pojazdów metra z uwzględnieniem dwóch stanów niezdatności. System predykcyjny będzie pozwalał na kontrolę procesów λ_{12} oraz λ_{13} .



Rys. 5.2. Proces eksploatacji i utrzymania pojazdów warszawskiego metra
Źródło: opracowanie własne

Objaśnienia oznaczeń na rys. 5.2.:

- S_1 – stan zdadności nowego pojazdu lub po przeglądzie,
- S_2 – stan niezdatności prawnej po osiągnięciu limitu kilometrowego lub czasowego,
- S_3 – stan niezdatności po awarii lub uszkodzeniu – niezdatność fizyczna,
- λ_{12} – parametr charakteryzujący proces degradacji w trakcie eksploatacji,
- λ_{13} – parametr charakteryzujący proces uszkodzenia (awarii) w trakcie eksploatacji,
- μ_{31} – parametr charakteryzujący proces naprawy po uszkodzeniu (awarii) w trakcie eksploatacji,
- μ_{21} – parametr charakteryzujący proces obsługi profilaktycznej pojazdu.

Procesy utrzymaniowe w ramach DSU obrazuje fragment karty tego dokumentu przedstawiony na Rys. 5.3. Jest to część czynności utrzymaniowych charakteryzująca proces μ_{21} przedstawiony na Rys. 5.2.

Dokumentacja Systemu Utrzymania										
Typ pojazdu		Użytkownik pojazdu:			Data	13-09-2022	Strona	128		
		Metro Warszawskie Sp. z o.o.			Numer	TD053892	Arkusze [str.]	22 [1/5]		
22. ARKUSZ PRZEGLĄDOWO-NAPRAWCZY. URZĄDZENIA ELEKTRYCZNE NA WÓZKU.										
Lp.	Poziom utrzymania							Czynności	Wymagania	Załącznik
	P1	P2	P3	P4.1	P4.2	P4.3	P5			
Silnik trakcyjny										
1	X	X	X	X			Oględziny silnika trakcyjnego	Przeprowadzić kontrolę wzrokową całego silnika pod względem mocowania, kompletności oraz widocznych uszkodzeń mechanicznych. Sprawdzić drożność kanałów wentylacyjnych (brak ciał obcych). Sprawdzić stan przyłączy elektrycznych (brak uszkodzeń izolacji, poprawność mocowania). Nieprawidłowości usunąć.		
2		X	X	X			Sprawdzenie drożności kratki wentylacyjnych	Sprawdzić kratki pod kątem ich zablokowania ciałami obcymi. W razie potrzeby przeczyścić sprężonym powietrzem.		
3				X	X	X	Smarowanie łożysk	Przeprowadzić smarowanie łożysk z użyciem smaru typu BHP 72-102 lub ekwiwalentnego wg procedury opisanej w dokumencie EdP12395, zawartym w Załączniku 22 do Planu Utrzymania.	1	
4				X	X	X	Spuszczenie wody z silnika	Odwodnić silnik wg procedury opisanej w dokumencie EdP12395, zawartym w Załączniku 22 do Planu Utrzymania. Wymienić uszczelnienia.		
5				X	X	X	Naprawa silnika	Silnik zdemontować z pojazdu, rozmontować i poddać czyszczeniu. Przeprowadzić szczegółową kontrolę stanu technicznego uzwojeń i połączeń elektrycznych (brak śladów przebiegów, uszkodzeń izolacji). Wymienić łożyska wału i uszczelnienia. Procedurę przeprowadzić zgodnie z zapisami instrukcji EdP12395, zawartej w Załączniku 22 do Planu Utrzymania.		

Rys. 5.3. Przykładowa karta Dokumentacji Systemu Utrzymania

Źródło: dokumentacja techniczno-ruchowa pojazdów typu Varsovia produkcji Skoda [17].

5.3. Wykorzystanie metody predykcyjnej w utrzymaniu taboru

Metoda predykcyjna w utrzymaniu taboru kolejowego jest to system wnioskowania o stanie różnych elementów pojazdu kolejowego na podstawie wiedzy o stanie tych elementów i zmianie ich stanu w funkcji czasu. Zatem, system predykcyjny oparty jest na danych rejestrowanych w systemie parametrycznym, który jest ważnym narzędziem w utrzymaniu taboru kolejowego.

System taki umożliwia nie tylko redukcję kosztów, ale także zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia niezawodności transportu. Jego skuteczne wdrożenie i eksploatacja zależą od spełnienia szeregu wymogów technologicznych, organizacyjnych i operacyjnych.

System parametryczny jest podstawą informacji o stanie parametrów każdego elementu pojazdu zawierającego sensory mogące dokonywać pomiaru on-line. Zbiera on i rejestruje wszystkie informacje o stanie poszczególnych podzespołów pojazdu. Dzięki temu, możliwe będzie zbudowanie systemu predykcyjnego, a tym samym poprawa ogólnej dostępności,

wydajności i niezawodności taboru. Aby jednak w pełni wykorzystać ten potencjał, niezbędne jest spełnienie wymienionych warunków wstępnych.

System predykcyjny, aby mógł dokonać stosownej predykcji, zbiera dane bazując na systemie parametrycznym. Proces zasadniczy polega na zbieraniu danych z różnorodnych czujników i systemów monitorujących w czasie rzeczywistym np. takie parametry jak: drgania (z akcelerometrów), temperatura, ciśnienie, prędkość obrotowa, prąd, napięcie, a nawet zużycie materiałów eksploatacyjnych itp. Dane te służą do oceny stanu określonych elementów pojazdu. Są one analizowane w celu porównania ze wzorcem lub wykrycia wzorców i anomalii, które mogą wskazywać na przyszłe awarie lub potrzebę czynności utrzymaniowych określonych elementów pojazdu. Na podstawie tych danych oprogramowanie generuje odpowiednią prognozę i przedstawia raport dla obsługi lub też algorytmy uczenia maszynowego generują prognozy dotyczące optymalnego czasu na przeprowadzenie konserwacji, wymiany części, czy innych interwencji utrzymaniowych.

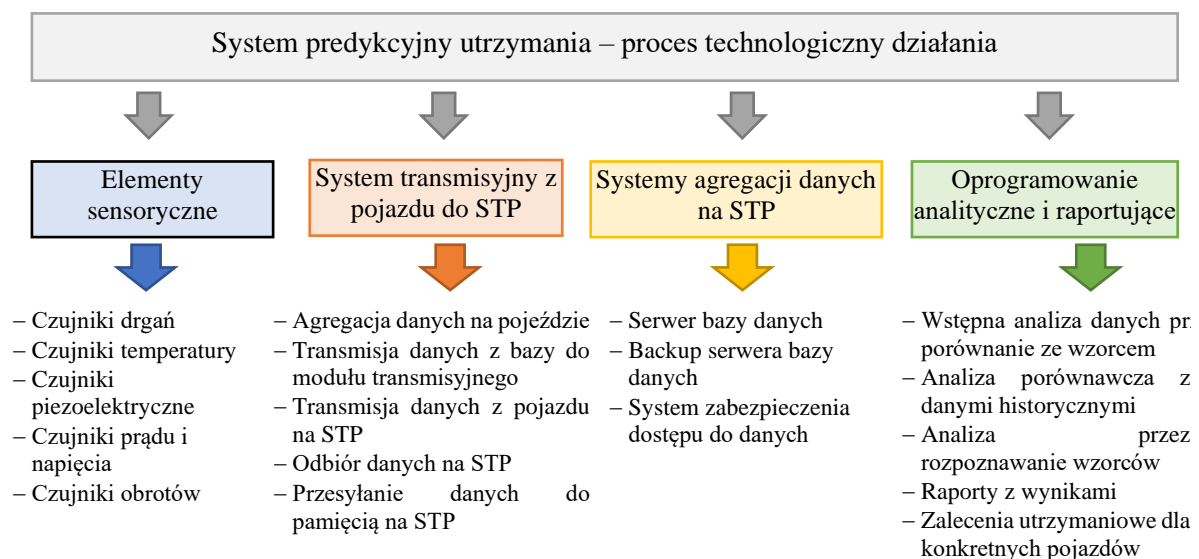
Analiza wskazuje, że najważniejszym wymaganiem wstępnym dla wdrożenia systemu jest dostępność na danym pojeździe elementów sensorycznych, czujników i urządzeń pomiarowych. Aby system predykcyjny mógł efektywnie funkcjonować, pojazdy powinny być wyposażone w odpowiednią aparaturę mierzącą różne parametry techniczne. Czujniki te powinny rejestrować stany określonych wielkości fizycznych w czasie rzeczywistym, a następnie dane te są przesyłane do centralnego systemu monitorującego przez systemy transmisyjne pojazdu kolejowego oraz sieć zewnętrzną.

Następnie odpowiednio zaawansowane oprogramowanie dokonuje analizy danych. Oprogramowanie takie musi posiadać możliwości przetwarzania dużych ilości danych oraz moduły oprogramowania do analizy statystycznej i przetwarzania sygnałów. Niezbędnym elementem jest także posiadanie odpowiedniej infrastruktury IT na Stacji Techniczno-Postojowej do przesyłania, przechowywania i zabezpieczania przesyłanych danych. Systemy powinny być wyposażone w odpowiednie rozwiązania backupowe i zabezpieczenia przed utratą danych.

Do analizy danych otrzymanych z pojazdu w niektórych przypadkach wykorzystane mogą być algorytmy uczenia maszynowego np. sztuczne sieci neuronowe mogące rozpoznawać wzorce sygnałów i wnioskować na tej podstawie. Kolejnym wymaganiem dla systemu predykcyjnego jest integracja z istniejącymi systemami zarządzania flotą, tak aby konieczne czynności utrzymaniowe wynikające z analizy systemu parametrycznego były automatycznie przekazywane do odpowiednich komórek logistycznych.

Ponadto system taki wymaga wyszkolonej kadry inżyniersko-technicznej. Inżynierowie i technicy powinni być odpowiednio przeszkoleni w zakresie obsługi nowoczesnych systemów monitorowania i diagnostyki, a także w interpretacji danych przekazywanych przez system predykcyjny. System predykcyjny wymaga także regularnych aktualizacji oprogramowania i sprzętu, a także ciągłego monitoringu sprawności systemu, co jest kluczowe dla utrzymania jego wiarygodności i skuteczności.

Rysunek 4.4 przedstawia główne aspekty procesu funkcjonowania systemu predykcyjnego bazującego na systemie parametrycznym.



Rys. 5.4. Proces funkcjonowania systemu predykcyjnego bazującego na systemie parametrycznym

źródło: opracowanie własne

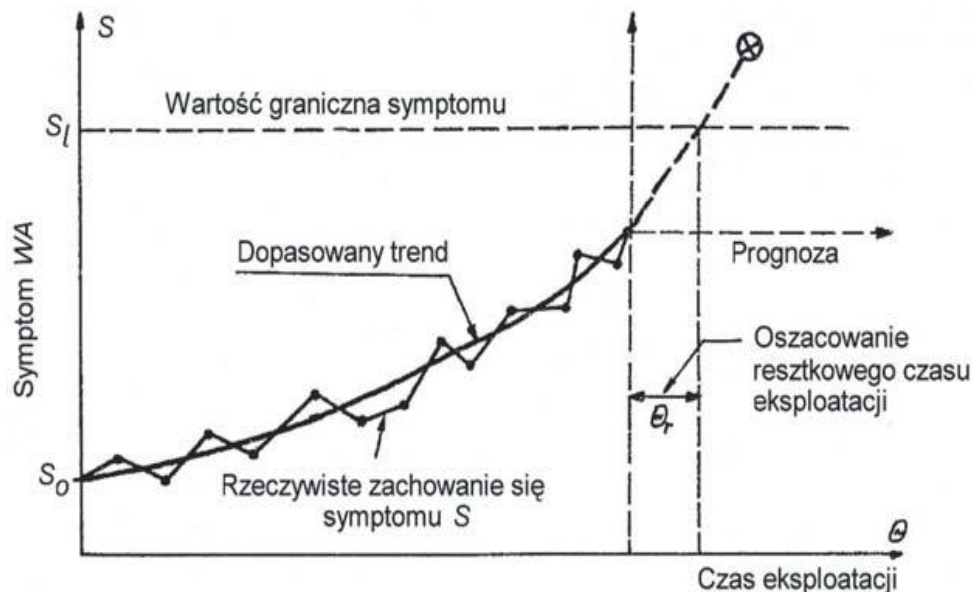
5.4. Analiza danych z sensorów zabudowanych na pojazdach

Sygnały rejestrowane przez różnego rodzaju czujniki i urządzenia pomiarowe są zasadniczym elementem systemu parametrycznego, na którym dla danego pojazdu zbudowany będzie system predykcyjny. Pomiary, w każdym przypadku, będą wykonywane online i wysyłane do serwera danych na pojeździe, a stamtąd do Stacji Techniczno-Postojowej, gdzie dokonywana będzie analiza i ocena stanu urządzeń pojazdu na tej podstawie.

Każdy z elementów sensorycznych musi mieć ściśle określone warunki pracy oraz zdefiniowane zakresy wartości pomiarowych. Powinny to być określone wartości wielkości mierzonych dla prawidłowej pracy danego podzespołu, zakresy pracy ze wskazaniem do czynności utrzymaniowych, oraz zakresy nieprzekraczalne, których osiągnięcie będzie generowało natychmiastowy alarm wymuszający zatrzymanie pojazdu na najbliższej stacji

i przekazanie go do koniecznych czynności utrzymaniowych. Oznacza to, że dla każdego podzespołu pojazdu należy wskazać parametr lub zestaw parametrów, czyli wielkości fizycznych jednoznacznie definiujących jego stan, zestaw czujników pomiarowych, które te wielkości będą mierzyły oraz zakresy pracy prawidłowej.

Zagadnienie zakresów wartości wielkości fizycznych charakteryzujących prawidłowość pracy konkretnego podzespołu pojazdu obrazuje wykres na rys. 4.5.



Rys. 5.5. Prognozowanie resztkowego czasu eksploatacji [2]

Źródło: [2]

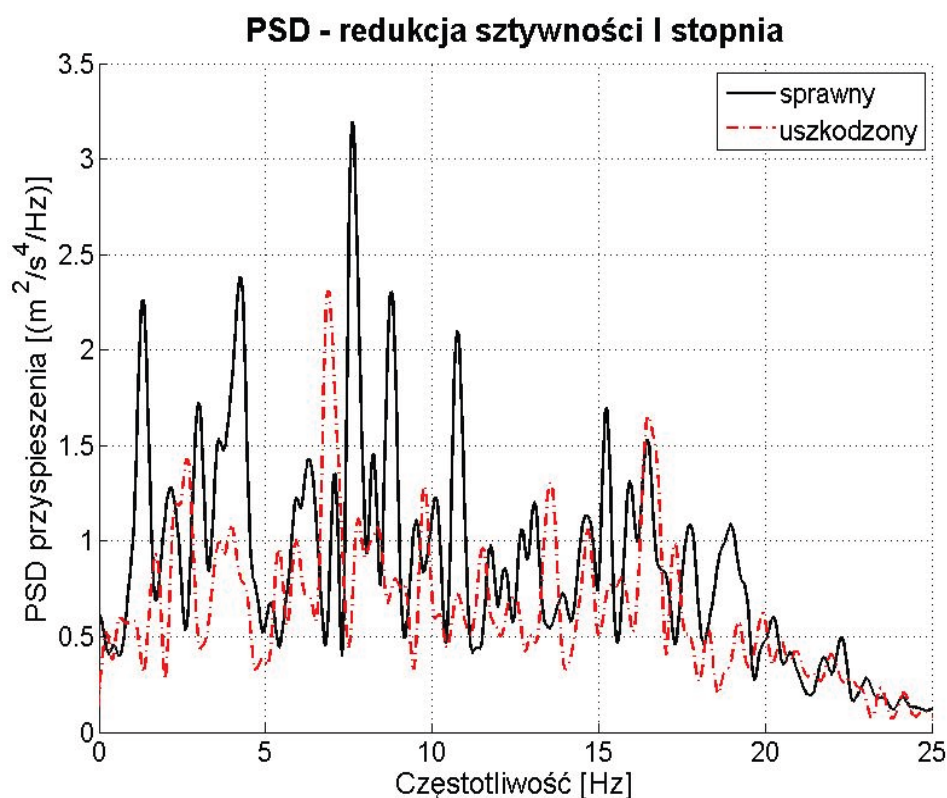
W każdym przypadku wybrany parametr „ S ” charakteryzujący stan konkretnego podzespołu, obserwowany on-line od wartości S_0 , w każdym następnym momencie musi mieć określony trend, tak aby móc prognozować „pozostały czas eksploatacji” θ_r , tak aby nie osiągnąć, a tym bardziej nie przekroczyć wartości S_l . Wartość θ_r jest kluczowym parametrem.

Określenie zakresu wartości wielkości fizycznych jest bardzo rozbudowanym problemem. Można tu wyróżnić wielkości prostsze, których analiza nie wymaga stosowania bardzo zaawansowanych technik analitycznych, np. temperatura oraz takie, które będą wymagały zastosowania metod analitycznych z zakresu uczenia maszynowego, np. analiza drgań pojazdu kolejowego w eksploatacji.

Spośród wielkości fizycznych, które będą wykorzystywane w procesie oceny stanu elementów pojazdu w systemie parametrycznym, odpowiedzialnych za bezpieczeństwo eksploatacji można wymienić następujące sygnały:

➤ Drgania z akcelerometrów

W przypadku drgań otrzymuje się sygnał z czujników pojazdu zamontowanych np. na maźnicach zestawu kołowego. Sygnał drgań rejestrowany z akcelerometru będzie kluczowy do badania takich podzespołów pojazdu jak m.in.: stanu osi jezdnej, stanu kół (powierzchni), stanu łożysk tocznych maźnicy, trwałości ramy wózka, itp. (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Analiza widmowa drgań zarejestrowanych dla zawieszenia I stopnia pojazdu
źródło: [52]

➤ Temperatura

Temperatura jest parametrem charakterystycznym dla badania takich podzespołów pojazdu jak m.in.: łożyska toczne maźnicy, łożysko silnika napędowego, silnik napędowy, tarcze hamulcowe.

➤ Prędkość obrotowa

Czujniki prędkości obrotowych są ważnym parametrem do badania takich systemów pojazdu jak m.in.: system napędowy czy system hamowania (badanie poślizgów).

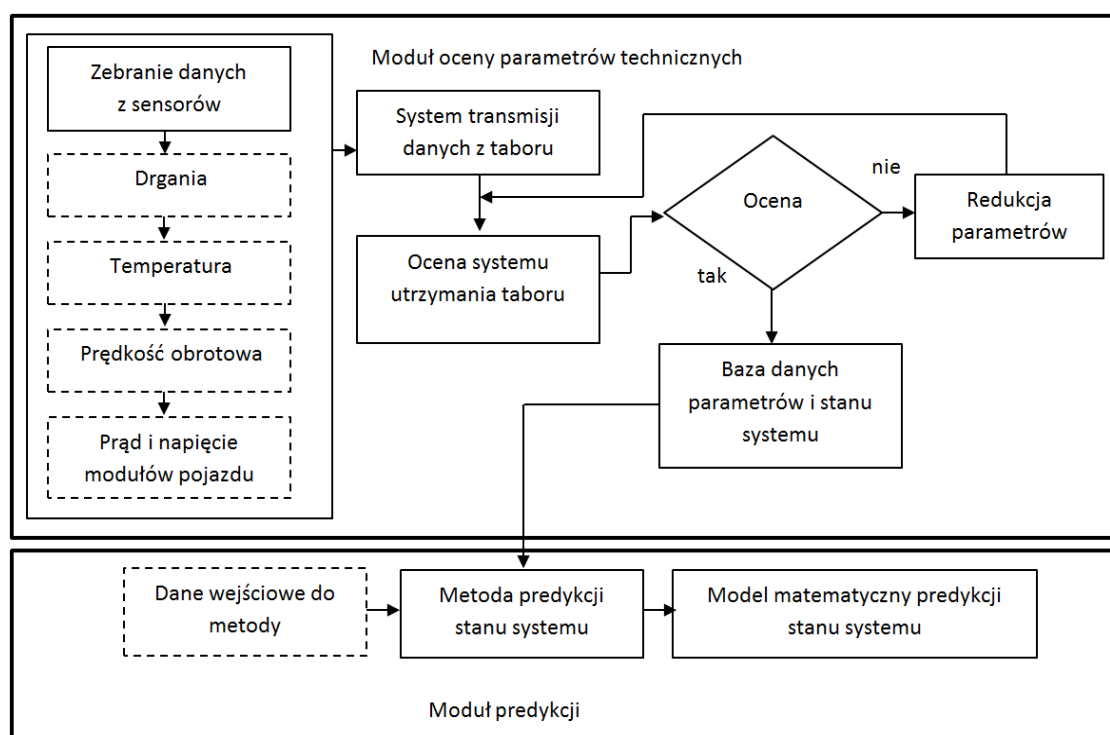
➤ Kamera termowizyjna

Kamera termowizyjna jest w stanie kontrolować stan temperatur w obszarach dynamicznie pracujących struktur mechanicznych. Zatem jest ważnym parametrem do badania takich systemów pojazdu jak m.in.: przekładnia główna, silnik trakcyjny, maźnica zestawu kołowego, skrzynia napędowa.

➤ Prądy i napięcia poszczególnych modułów pojazdu

Takimi parametrami jak prąd i napięcie można kontrolować cały szereg urządzeń, w których znajdują się obwody elektryczne lub elektroniczne.

Na Rys. 5.7. przedstawiono schematycznie strukturę modelu systemu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego przy wykorzystaniu projektowanego systemu predykcyjnego bazującego na danych z systemu parametrycznego.



Rys. 5.7. Schemat struktury modelu systemu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego
źródło: opracowanie własne.

5.5. Ograniczenia systemu predykcyjnego utrzymania taboru

System predykcyjny, pomimo swoich nie wątpliwych zalet posiada też swoje ograniczenia. Nie zawsze możliwa będzie rezygnacja z czynności utrzymaniowych. Najprostszymi przykładami takich ograniczeń są chociażby: uzupełnianie płynów eksploatacyjnych, mycie

i czyszczenie pojazdów oraz podzespołów pojazdów czy też wymiana elementów szybko zużywających się, takich jak np. elementy gumowe czy też elementy oświetleniowe. Nie są to jednak najważniejsze ograniczenia takich systemów. Spośród wielu ograniczeń można wymienić następujące:

1) Zależność wyników pracy systemu od jakości danych z sensorów

Skuteczność i bezpieczeństwo systemu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego jest bezpośrednio związane z jakością i integralnością rejestrowanych danych. Sygnały, które są rejestrowane powinny być kompletne, być odpowiedniej jakości czyli dokładności aby mogły być traktowane jako wiarygodne, aby algorytmy mogły prawidłowo przewidzieć potencjalne problemy i zaplanować odpowiednie działania serwisowe.

Problemy z jakością danych mogą wynikać z wielu czynników, w tym z nieprawidłowo skalibrowanych lub uszkodzonych czujników, błędów w oprogramowaniu zbierającym dane lub nieadekwatnych protokołów przesyłania danych. Wadliwe dane mogą prowadzić do nieprawidłowych analiz, takich jak błędne przewidywanie awarii, co z kolei może skutkować niepotrzebnymi przeglądami, zwiększeniem kosztów utrzymania taboru czy też operacyjnych. Wpływ jakości danych na wyniki funkcjonowania systemów obrazują prace [1], [83].

2) Wrażliwość systemów wynikająca z ich skomplikowania

Systemy predykcyjne, to niezwykle złożone konstrukcje, zawierające wiele zależnych od siebie elementów. Z tego powodu są one podatne na różnego rodzaju awarie, zarówno sprzętowe, jak i softwarowe. Awarie w części sprzętowej mogą być spowodowane uszkodzeniami fizycznych komponentów systemu, takich jak serwery baz danych, urządzenia transmisyjne czy sieciowe, a nawet uszkodzeniami kablowych linii przesyłowych. Mogą to być także zakłócenia zewnętrzne, które wpływają na prawidłowość działania systemu.

Błędy działania systemu w części softwarowej mogą być spowodowane błędami w produkcji oprogramowania, opóźnieniami współdziałania systemów, a nawet atakami cybernetycznymi. Jakiegokolwiek zakłócenia w funkcjonowaniu systemu mogą przerwać zbieranie danych, a nawet uniemożliwić zdolność systemu do monitorowania stanu pojazdów. Zagrozić to może nie tylko prawidłowości planowania utrzymania, ale także bezpieczeństwu eksploatacji pojazdów. Rejestrowane dane w przypadku awarii systemu, mogą być nieaktualne, niekompletne lub całkowicie niedostępne, co eliminuje możliwość prowadzenia efektywnego monitoringu i analizy predykcyjnej. Systemy predykcyjne są skomplikowane zarówno w zakresie technologicznym, jak i operacyjnym, co z kolei może być przyczyną błędów obsługowych

zespołów nadzorujących. Wymusza to częste i regularne szkolenia w zakresie obsługiwanych technologii i metod analizy danych.

3) Odporność systemu na zmienne warunki eksploatacyjne

Sensory wykorzystywane do rejestracji danych oraz inne urządzenia pomiarowe instalowane w pojazdach kolejowych są często narażone na szereg trudnych warunków eksploatacyjnych, które mogą wpłynąć na ich działanie i skuteczność. Często zmieniające się warunki eksploatacji takie jak np. ekstremalne temperatury, wysoki poziom wilgoci, stałe i praktycznie w kolejnictwie niemożliwe do wyeliminowania wibracje, różnego rodzaju zanieczyszczenia czy też wpływ pola magnetycznego mogą prowadzić do rejestracji nie prawdziwych wartości odczytów lub nawet uszkodzeń czujników. Przykładowo czujniki temperatury mogą nieprawidłowo rejestrować wartości w skrajnych warunkach termicznych, co prowadzi zazwyczaj do błędnych lub całkowicie nie możliwych danych. Założenia projektowe powinny brać pod uwagę takie czynniki, aby utrzymać prawidłowość pracy w trudnych warunkach i dostarczać wiarygodne dane. Wymaga to zastosowania zaawansowanych technologii materiałowych i ochronnych. Zwiększa to koszty oraz skomplikowanie systemów. Wiarygodność danych we wszystkich warunkach eksploatacyjnych jest zasadniczym elementem prawidłowości funkcjonowania systemu predykcyjnego. Jak istotny wpływ mają warunki pracy sensorów pokazują prace [55] oraz [48].

4) Błędy modelowania systemu

Zasadniczym elementem będącym istotnym dla prawidłowości działania systemu predykcyjnego jest prawidłowy wybór dokładności modelu. Wybór niewłaściwego poziomu szczegółowości modelu może prowadzić do różnego rodzaju błędów od złej oceny stanu pojazdu do zbyt częstych zaleceń działań utrzymaniowych. Modele zbyt ogólne mogą nie uwzględniać ważnych aspektów działania elementów pojazdu, specyficznych dla danej sytuacji. Natomiast modele nadmiernie szczegółowe mogą prowadzić do przekłamań i nieprawidłowych ocen.

5) Odporność systemu na nie występujące wcześniej wzorce i inne anomalie

Modele predykcyjne mogą zawodzić, szczególnie w chwili wystąpienia sytuacji awaryjnych, gdy pojawiają się nowe wzorce danych wcześniej nie rejestrowane, ponieważ nie były widoczne podczas treningu modelu. W takich sytuacjach model może nie być w stanie prawidłowo ocenić czy zinterpretować otrzymanych danych, wynikiem czego będzie błędna

predykcja. Anomalie, które są naturalne w rzeczywistych systemach, mogą dodatkowo komplikować sytuację modeli predykcyjnych.

6) Integracja z systemami istniejącymi

Integracja nowych systemów predykcyjnych z już istniejącymi systemami IT i operacyjnymi może być trudna i kosztowna. Niekompatybilność systemów (nawet od jednego producenta) czy też różnice w standardach danych czy standardach technologicznych są źródłem konieczności ciągłej synchronizacji danych, co przy dużej ich ilości w złożonych systemach predykcyjnych stanowi duże wyzwanie.

7) Nadmiar informacji

Systemy predykcyjne często generują ogromne ilości danych. Tak duża ilość danych stanowi wyzwanie zarówno dla zastosowanych rozwiązań technologicznych, jak też dla obsługi systemów. Aby nie prowadziło to do negatywnych skutków systemy raporty generowane przez takie systemy powinny być jednoznaczne i powinny sugerować konkretne działania, które obsługa po analizie uzna za zasadne lub nie.

8) Koszty wdrożenia

Jedną z istotniejszych wad systemów predykcyjnych jest wysoki koszt ich projektowania i wdrożenia. Szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że są to rozwiązania nowe na skalę światową i w związku z tym, każdy taki system jest prototypowy. Ogromne koszty generuje też samo dostosowanie pojazdów do takiego systemu. Wymaga on zainstalowania zaawansowanych czujników, rozbudowania infrastruktury informatycznej dla gromadzenia danych i ich analizowania.

Konkludując należy podkreślić, że wszystkie wymienione elementy ograniczeń należy brać pod uwagę już w fazie planowania takiego systemu. Ten proces jest niezbędny, aby skuteczność systemu mogła przekładać się na jego efektywność.

6. Model predykcyjny utrzymania taboru kolejowego

6.1. Założenia ogólne modelu

Głównym założeniem do budowy modelu jest dostarczenie narzędzia wspomagającego ocenę i predykcję stanu istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji elementów pojazdu (główne moduły). Narzędzie w postaci systemu predykcyjnego będzie głównym elementem utrzymania taboru. Najważniejszym elementem takiego systemu, jest system parametryczny, czyli system zbierania i analizy danych oraz system analityczny i predykcyjny oceniający stan elementów pozostały czas eksploatacji.

System parametryczny w utrzymaniu pojazdów kolejowych odnosi się do zastosowania technologii opartej na parametrach podzespołów, które charakteryzują stan każdego podzespołu i pozwala na jego monitorowanie, diagnostykę oraz zarządzanie utrzymaniem tego elementu taboru kolejowego. System wykorzystuje dane referencyjne oraz odpowiednie algorytmy do analizy danych pochodzących z różnych czujników i systemów pojazdów, które są następnie przetwarzane i wykorzystywane do przewidywania potrzeb utrzymaniowych oraz optymalizacji procesów utrzymaniowych.

Parametry w systemie powinny być jasno zdefiniowane. Obejmują one, między innymi, cechy charakteryzujące stan systemów napędowych, stan osi i kół, łożysk czy też elementy systemu hamulcowego. Każdy z tych parametrów może być monitorowany na bieżąco i analizowany w celu oceny stanu technicznego pojazdu.

Niezbędnym warunkiem, aby mieć wiedzę o parametrach podzespołów pojazdu jest posiadanie zaawansowanych systemów czujników zainstalowanych w pojazdach. Czujniki takie zbierają dane operacyjne w czasie rzeczywistym, które są następnie wykorzystywane do analizy parametrycznej. Zarejestrowane dane przesyłane są do serwera głównego, na którym zainstalowane jest odpowiednie oprogramowanie analityczne.

Oprogramowanie musi być w stanie efektywnie przetwarzać i analizować duże ilości danych, korzystając, w zależności od rodzaju sygnału, z analizy porównawczej, a w niektórych przypadkach konieczne jest użycie algorytmów uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji do przewidywania przyszłego stanu pojazdów i potrzebnych interwencji utrzymaniowych.

Całość musi stanowić zintegrowany system działający on-line, przekazujący odpowiednie raporty okresowe oraz alarmy systemowe. Systemy stanowią zasadnicze wsparcie decyzyjne dla zarządzających flotą pojazdów, dostarczając rekomendacje dotyczące optymalnych terminów przeglądów, wymiany części czy innych interwencji serwisowych. Niezwykle

istotnym dla efektywności działania systemu parametrycznego jest dostęp do szerokiej bazy danych historycznych, co umożliwi lepsze zrozumienie trendów i wzorców zużycia elementów pojazdów, a przede wszystkim jest wykorzystywane do trenowania sieci neuronowych oceniających stan i dokonujących predykcji.

Praktycznym wymogiem dla systemu parametrycznego wynikającym zarówno z teorii jak też praktyki, jak wskazano w rozdziale 4, jest jego modułowość i skalowalność, co pozwala na jego łatwą adaptację i rozbudowę w miarę rozwijania floty oraz wprowadzania nowych technologii. Innym praktycznym elementem systemu jest jego cykliczna aktualizacja i konserwacja. Zarówno oprogramowanie jak też inne elementy (np. system transmisji danych) systemu parametrycznego wymagają regularnych aktualizacji, aby zapewnić ich skuteczność i aktualność w świetle zmieniających się warunków eksploatacyjnych i technologicznych.

Całość realizacji systemu wymaga posiadania odpowiedniej infrastruktury IT do zarządzania i przechowywania danych, w tym serwerów, baz danych oraz systemów backupu i ochrony danych. Kluczowy, w kontekście prawidłowości działania systemu predykcyjnego, jest proces kalibracji opisanych wyżej zakresów prawidłowej pracy dla każdego z parametrów obserwowanych.

Kalibracja ta opierać się musi na analizie z wykorzystaniem dostępnych narzędzi i bazować musi na zbiorze danych wcześniej zarejestrowanych w eksploatacji pojazdu lub pomiarów wykonanych laboratoryjnie. Zadanie takie jest stosunkowo złożone, ponieważ należy wybrać podejście zachowawcze, ale nie nadbyt zachowawcze. Nie byłoby zasadne takie ustalenie poziomu serwisowego, aby wycofywanie pojazdu z eksploatacji było zbyt częste lub następowało dla pojedynczego elementu przed agregacją poziomów serwisowych dla całej grupy elementów do obsługi. Przestrzeń zapasu eksploatacyjnego musi obejmować taki czas, w którym wszystkie lub co najmniej 2/3 elementów znajdzie się w zakresie serwisowym, tak aby pojedyncze zatrzymanie pojazdu obejmowało obsługę jak największej liczby podzespołów danego typu.

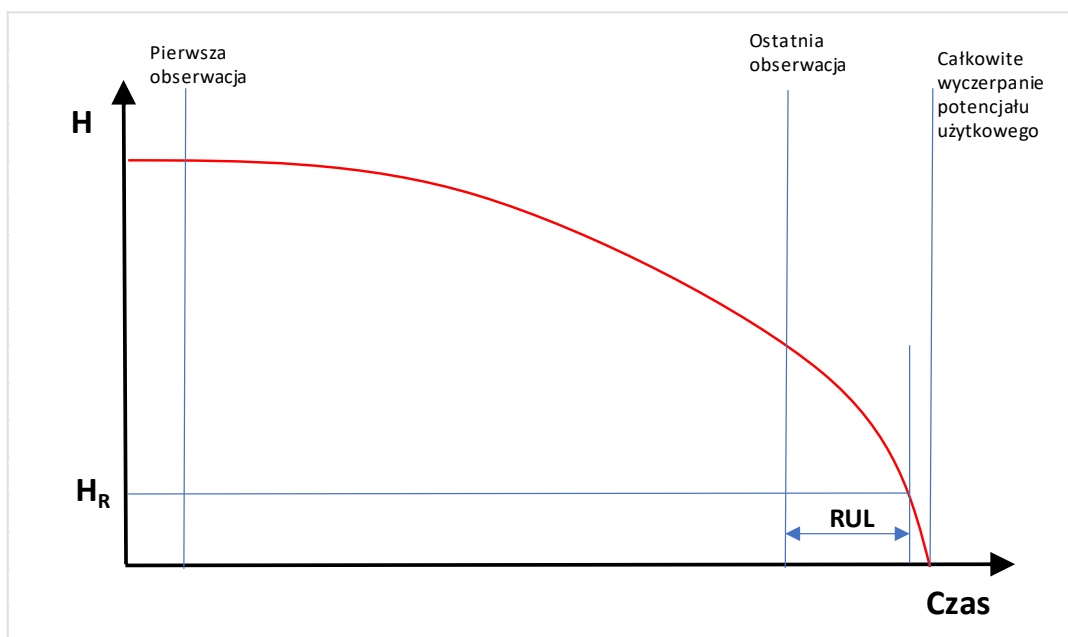
Optymalna kalibracja poziomu obsługowego to kluczowy element tej transformacji systemu utrzymaniowego, ponieważ wymaga stosunkowo długiego okresu eksploatacji dla samej agregacji danych do dalszej analizy. Okres taki może obejmować nawet do 3-5 lat, ponieważ kluczowe dla tego procesu jest zaobserwowanie procesów zużywania elementów i prawidłowe wyznaczenie predykcji dla każdego z nich.

Dla prawidłowego ustalenia poziomów serwisowych parametrów obserwowanych, niezbędne jest wykorzystanie analizy teorii niezawodności oraz biegła znajomość procesów degeneracyjnych dla każdego typu obserwowanego elementu pojazdu, tak aby przyjąć

prawidłowe wzorce przebiegu procesów zużywania się istotnych dla sprawności podzespołu elementów. Dla większości procesów starzenia urządzeń technicznych procesem niezawodności dobrze odwzorującym rzeczywisty jego przebieg będzie krzywa wannowa czyli wykres współczynnika awaryjności modelowany przez krzywą Weibulla [85], [59].

Na rys. 6.1. zobrazowano symbolicznie proces utraty potencjału użytkowego, tj. zdolności obiektu do wykonywania zadania zgodnie z przeznaczeniem. Taki przebieg procesu został zaproponowany w pracy [78] i prawidłowo opisuje ideę „zapasu sprawności” tj. pozostałego okresu użytkowania podzespołu pojazdu. Kontrola on-line kluczowych parametrów podzespołów pojazdu kolejowego jest kluczowym elementem oceny stanu podzespołu i predykcji pozostałego okresu użytkowania.

Biorąc pod uwagę fakt, że projektowanie pojazdów kolejowych wymaga stosunkowo dużego zapasu sprawności podzespołów pojazdu w najbardziej rozpowszechnionym planowo zapobiegawczym systemie utrzymania. Wykorzystanie systemu parametrycznego on-line do oceny stanu podzespołów i dokonania predykcji zapasu sprawności jest kluczowym elementem zarówno podniesienia bezpieczeństwa eksploatacji jak też oszczędności procesu.



Rys.6.1. Przykładowa krzywa utraty potencjału użytkowego

Źródło: [78]

Oznaczenia na rys. 6.1.

H – potencjał użytkowy

H_R – wartość resztkowa potencjału użytkowego

RUL – (*remaining useful life*) pozostały zapas zdolności

Dla zagadnienia badanego w rozprawie, istotne jest wyznaczenie RUL, tak aby w okresie eksploatacji, do czasu wykonywania czynności obsługowych wszystkie lub przynajmniej 2/3 modułów nadzorowanych znalazło się w przedziale RUL. Zatem, **zadaniem systemu predykcyjnego jest określenie stanu i prognozy zapasu zdatności badanego podzespołu pojazdu.**

Wyznaczenie zapasu zdatności jest procesem złożonym. W przypadku projektowanego systemu predykcyjnego szacunek zdatności będzie ustalany poprzez algorytmy procedury sprawdzającej, które system będzie prowadził dla określonych podzespołów istotnie odpowiedzialnych za bezpieczeństwo w analizie ryzyka.

6.2. Proces doboru podzespołów pojazdu i ich parametrów i zakresów

Zgodnie z przyjętymi założeniami, przedstawiony zostanie proces doboru podzespołów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo eksploatacji pojazdu i parametrów tych podzespołów jednoznacznie odzwierciedlających stan konkretnego podzespołu.

Spośród wielu elementów pojazdu należy wyznaczyć takie, których stan jest ważny z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji pojazdu. Aby wybrać zestaw elementów koniecznych dla prawidłowego funkcjonowania systemu należy przeprowadzić analizę ryzyka dla każdego z tych elementów.

Tabela 6.1 przedstawia zestawienie parametrów oceny prawdopodobieństwa wystąpienia oraz siły oddziaływania ryzyka dla ocenianych modułów.

Tabela 6.1. Zestawienie parametrów oceny ryzyka podzespołów pojazdu

Wartość Kryterium	Siła oddziaływania - skutki	Prawdopodobieństwo wystąpienia
1	Brak skutków	Zerowe lub prawie zerowe
2	Skutki nie są groźne	Niezwykłe rzadkie, prawie nie występujące
3	Skutki są uciążliwe	Bardzo rzadkie (raz w całej eksploatacji)
4	Skutki bardzo niebezpieczne	Zdarzające się (więcej niż raz w całej eksploatacji)
5	Skutki katastrofalne	Częste (raz na rok)


źródło: opracowanie własne.

Natomiast w Tabeli 6.2 przedstawiono macierz ryzyka dla kwalifikacji podzespołów pojazdu jako istotny element nadzoru systemu utrzymania. Wszystkie podzespoły, dla których poziom ryzyka jest nieakceptowalny powinny być uwzględnione w systemie nadzoru stanu pojazdu on-line.


Tabela 6.2. Macierz ryzyka oceny podzespołów pojazdu

Prawdopodob Skutki	1	2	3	4	5
5	5	10	15	20	25
4	4	8	12	16	20
3	3	6	9	12	15
2	2	4	6	8	10
1	1	2	3	4	5

źródło: opracowanie własne.

 - Poziom nieakceptowalny

 - Poziom akceptowalny

 - Poziom bezpieczny

Wybór podzespołów pojazdu, które należy nadzorować on-line w systemie predykcyjnym, powinien być wynikiem analizy ryzyka przeprowadzonej dla podstawowych elementów pojazdu kolejowego i w pełni odzwierciedlać ideę oceny stanu bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu. Bazując na wiedzy technicznej i wieloletnim doświadczeniu eksploatacyjnym w tabeli 6.3 przedstawiono, zgodnie z kryteriami zdefiniowanymi w tabeli 6.1, analizę ryzyka wybranych, istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji podzespołów pojazdu. Są to elementy przede wszystkim elementy układu biegowego, których uszkodzenie miało by poważny wpływ na bezpieczeństwo prowadzonej eksploatacji lub bezpieczeństwo pasażerów.

Stan każdego z wymienionych elementów (Tabela 6.3), ma niezwykle duże znaczenie dla oceny zdolności pojazdu do prowadzenia bezpiecznej eksploatacji. Dla każdego z elementów pojazdu, wyznaczonego na podstawie analizy ryzyka, należy zdefiniować zmienne rejestrowane przy pomocy systemu sensorycznego. W części przypadków będzie to przynajmniej jeden (jeśli wystarczająco dobrze określa stan elementu) parametr. Dla niektórych będzie to kilka parametrów pomiarowych, które będą jednoznacznie odzwierciedlały stan danego elementu.

Ważnym aspektem jest również opracowanie procedury (algorytmu) oceny przydatności badanego podzespołu do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania tego podzespołu.

Tabela 6.3. Analiza ryzyka poszczególnych podzespołów i układów pojazdu

L.p.	Podzespół (układ) pojazdu	Elementy poziomu ryzyka		
		Poziom prawdopodobieństwa wystąpienia P (1÷5)	Siła oddziaływania Q (1÷5)	Poziom Ryzyka = P x Q
1	koło jezdne – zestaw kołowy	3	5	15
2	oś jezdna – zestaw kołowy	3	5	15
3	maźnica – zestaw kołowy	2	5	10
4	łożysko gł. – zestaw kołowy	3	5	15
5	zawieszenie I stopnia	3	5	15
6	zawieszenie II stopnia	4	2	8
7	rama wózka jezdnego	3	5	15
8	przekładnia główna	3	4	12
9	łącznik wózek-pudło wagonu	2	4	8
10	tarcze hamulcowe	4	2	8
11	okładziny cierne hamulca	4	2	8
12	magistrala hamulcowa	3	3	9
13	sprzęg czołowy	4	2	8
14	sprzęg pośredni	4	2	8
15	oświetlenie wewn. wagonów	5	2	10
16	drzwi pasażerskie	5	3	15
17	silnik jezdny	3	3	9
18	przekształtnik główny	4	3	12

źródło: opracowanie własne.

Zastosowana tutaj metoda analizy ryzyka jest już dobrze ugruntowana i stosowana w analizach technicznych, które autor przeprowadził w pracy [56].

Dla potrzeb realizacji celu badań i jednoznaczności prowadzonych analiz, dla ośmiu elementów wymienionych w tabeli 6.3 elementów, dla których zgodnie z macierzą (tabela 6.2) ryzyko ich uszkodzenia jest nie akceptowalne (kolor czerwony), zidentyfikowano liczbę, rodzaj i zakresy parametrów pomiarowych, celem jednoznacznej oceny stanu badanego elementu. Na kolejnych rysunkach tj. Rys.6.2 – Rys.6.9 przedstawiono algorytmy oceny przydatności ośmiu badanych podzespołów do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania tego podzespołu. Elementy wymagające szczegółowej analizy to :

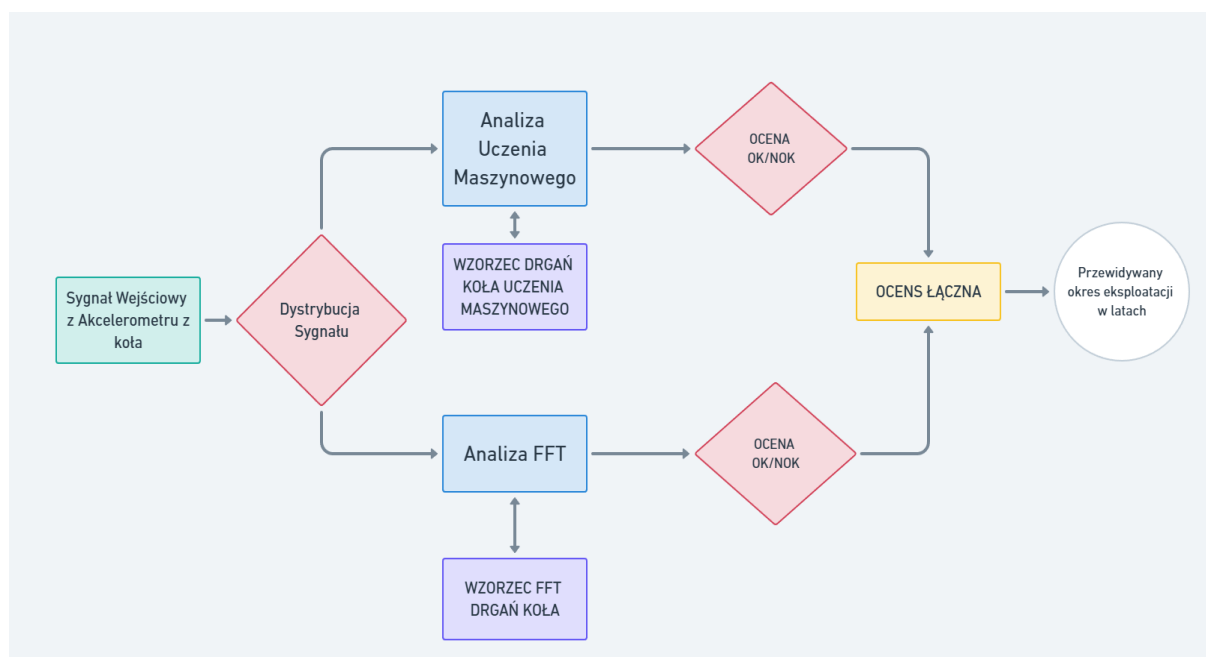
A. koło jezdne – zestaw kołowy – układ biegowy

- drgania rejestrowane w akcelerometrze (zakres wzorcowy):

Prawidłowo → wzorec → [odchylenie standardowe] → max [dwa sigma]

Prawidłowo → wzorec → [transformata FFT] → max [jedna trzecia + 1/4 amplitudy]

Rysunek 6.2 pokazuje algorytm oceny stanu koła jezdnego na danym wózku i zestawie kołowym. Algorytm wypracowuje ocenę przydatności podzespołu do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania podzespołu. Taki pomiar drgań i algorytm oceny jest wykonywany on-line dla każdego z 48 kół pojazdu.



Rys. 6.2. Algorytm oceny stanu koła jezdnego zestawu kołowego

źródło: opracowanie własne.

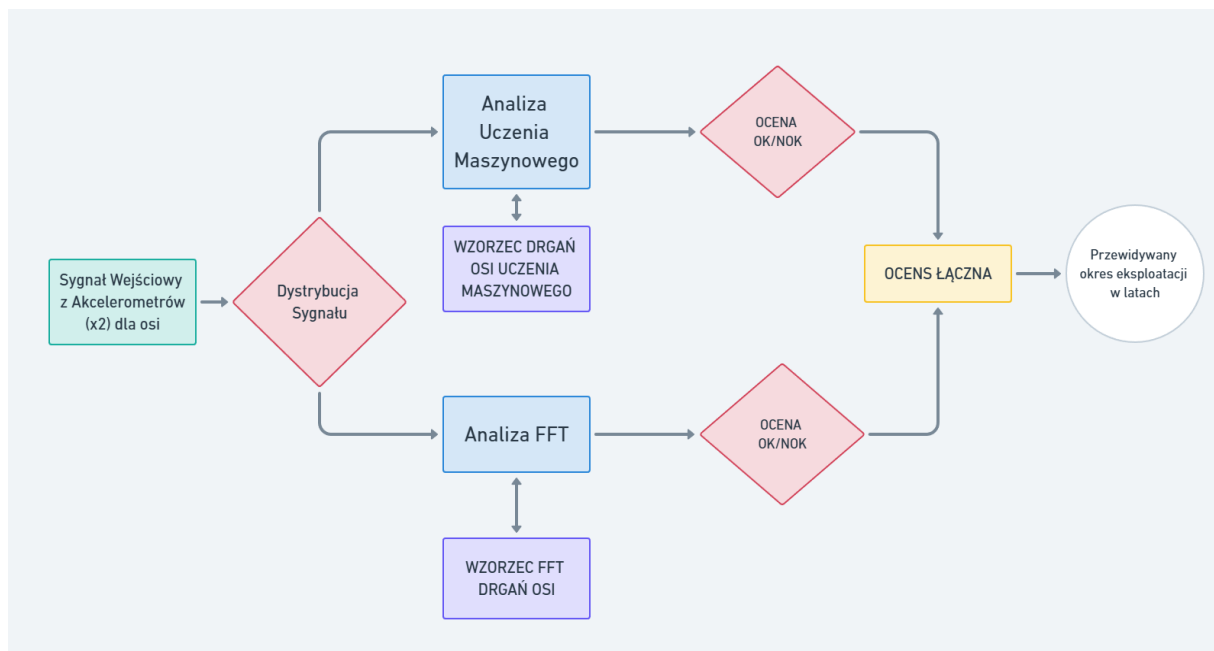
B. oś jezdna – zestaw kołowy – układ biegowy

- drgania rejestrowane w akcelerometrze (zakres wzorcowy):

Prawidłowo → wzorzec → serwis [odchylenie standardowe] → max [dwa sigma]

Prawidłowo → wzorzec → [transformata FFT] → max [jedna trzecja + 1/4 amplitudy]

Rysunek 6.3 pokazuje algorytm oceny dla oceny stanu osi jezdnej na danym wózku i zestawie kołowym. Algorytm wypracowuje ocenę przydatności podzespołu do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania podzespołu.



Rys. 6.3. Algorytm oceny stanu osi jezdnej zestawu kołowego

źródło: opracowanie własne.

Taki pomiar drgań i algorytm oceny jest wykonywany on-line dla każdej z 24 osi zestawu.

C. Łożysko główne maźnicy – zestaw kołowy – układ biegowy

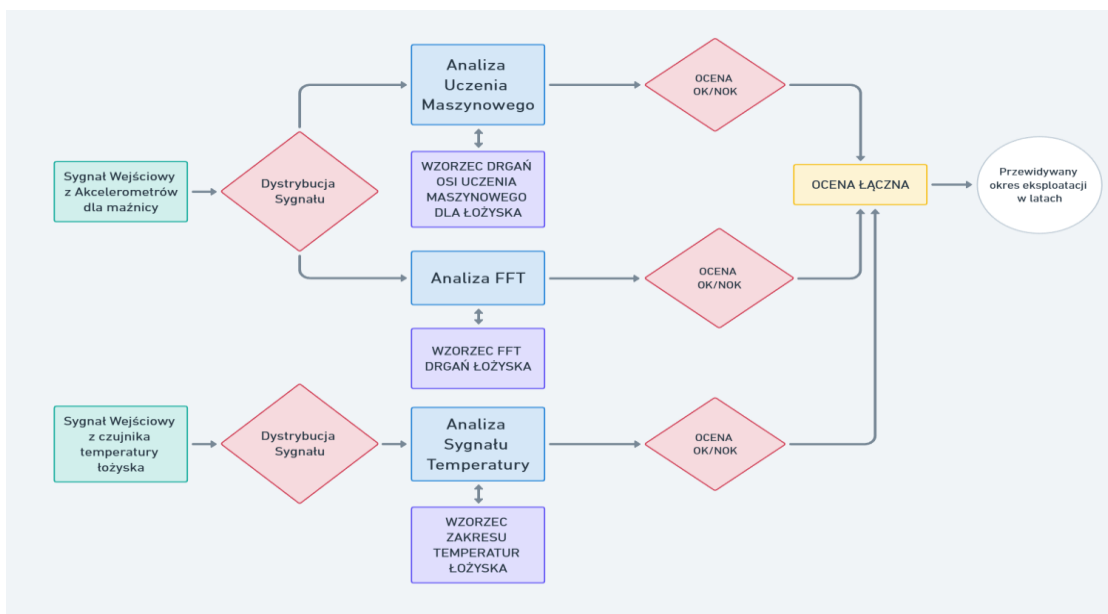
- dane rejestrowane w akcelerometrze (zakres wzorcowy):

Prawidłowo → wzorzec → serwis [odchylenie standardowe] → max [dwa sigma]

Prawidłowo → wzorzec → [transformata FFT] → max [jedna trzecja + 1/4 amplitudy]

- temperatura łożyska maźnicy < 150°

Rysunek 6.4 pokazuje algorytm oceny dla oceny łożyska maźnicy w danym zestawie kołowym. Algorytm wypracowuje ocenę przydatności łożyska maźnicy do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania podzespołu.



Rys. 6.4. Algorytm oceny stanu maźnicy koła jeźdnego zestawu kołowego
źródło: opracowanie własne.

Taki pomiar drgań i temperatury jest wykonywany on-line dla każdego z 48 łożysk maźnicy.

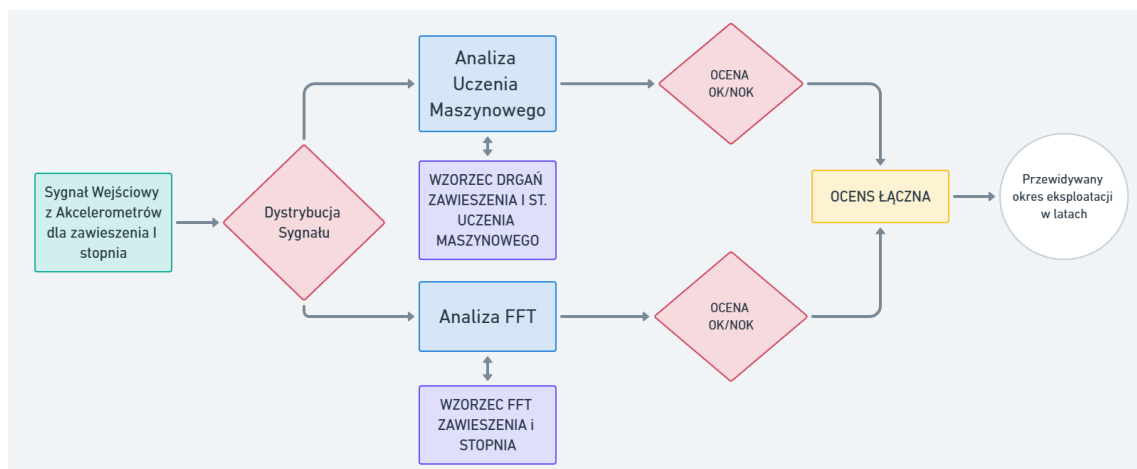
D. zawieszenie I stopnia – układ biegowy

– drgania rejestrowane w akcelerometrze (zakres wzorcowy):

Prawidłowo → wzorzec → serwis [odchylenie standardowe] → max [dwa sigma]

Prawidłowo → wzorzec → [transformata FFT] → max [jedna trzecja + 1/4 amplitudy]

Rysunek 6.5 pokazuje algorytm oceny dla zawieszenia I stopnia w danym zestawie kołowym. Algorytm wypracowuje ocenę przydatności zawieszenia do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania podzespołu.



Rys. 6.5. Algorytm oceny zawieszenia I stopnia.

Źródło: opracowanie własne

Taki pomiar drgań i temperatury jest wykonywany on-line dla każdego z 48 łożysk maźnicy.

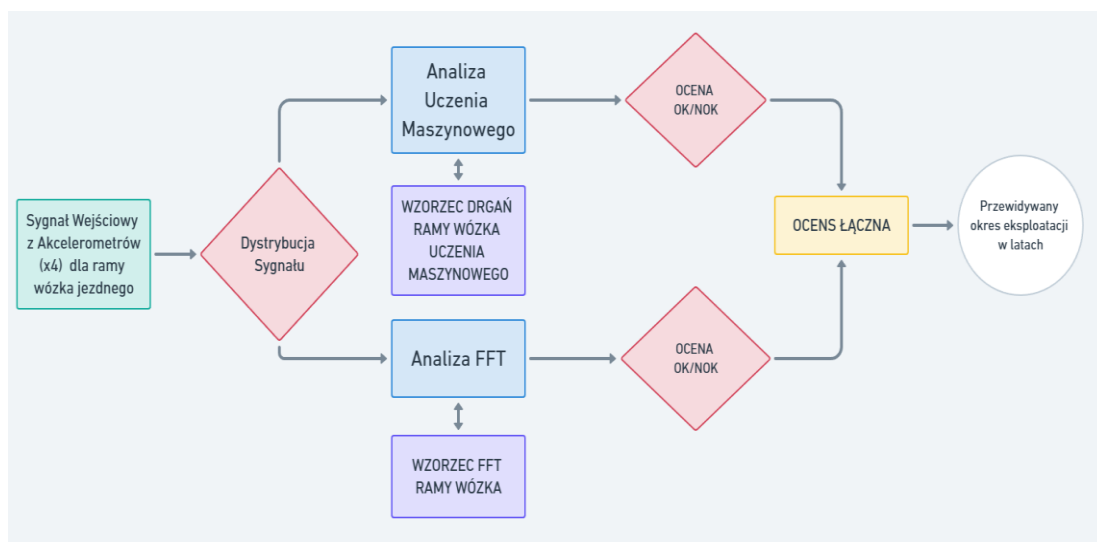
E. Rama wózka jezdnego – układ biegowy

- skorelowane drgania rejestrowane w akcelerometrze w 4 akcelerometrach wózka - na każdej maźnicy (zakres wzorcowy)

Prawidłowo → wzorzec → serwis [odchylenie standardowe] → max [dwa sigma]

Prawidłowo → wzorzec → [transformata FFT] → max [jedna trzecja + 1/4 amplitudy].

Rysunek 6.6 pokazuje algorytm oceny dla ramy wózka jezdnego w danym zestawie kołowym. Algorytm wypracowuje ocenę stanu ramy wózka oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania podzespołu.



Rys. 6.6. Algorytm oceny ramy wózka jezdnego.

Źródło: opracowanie własne

F. przekładnia główna – układ napędowy

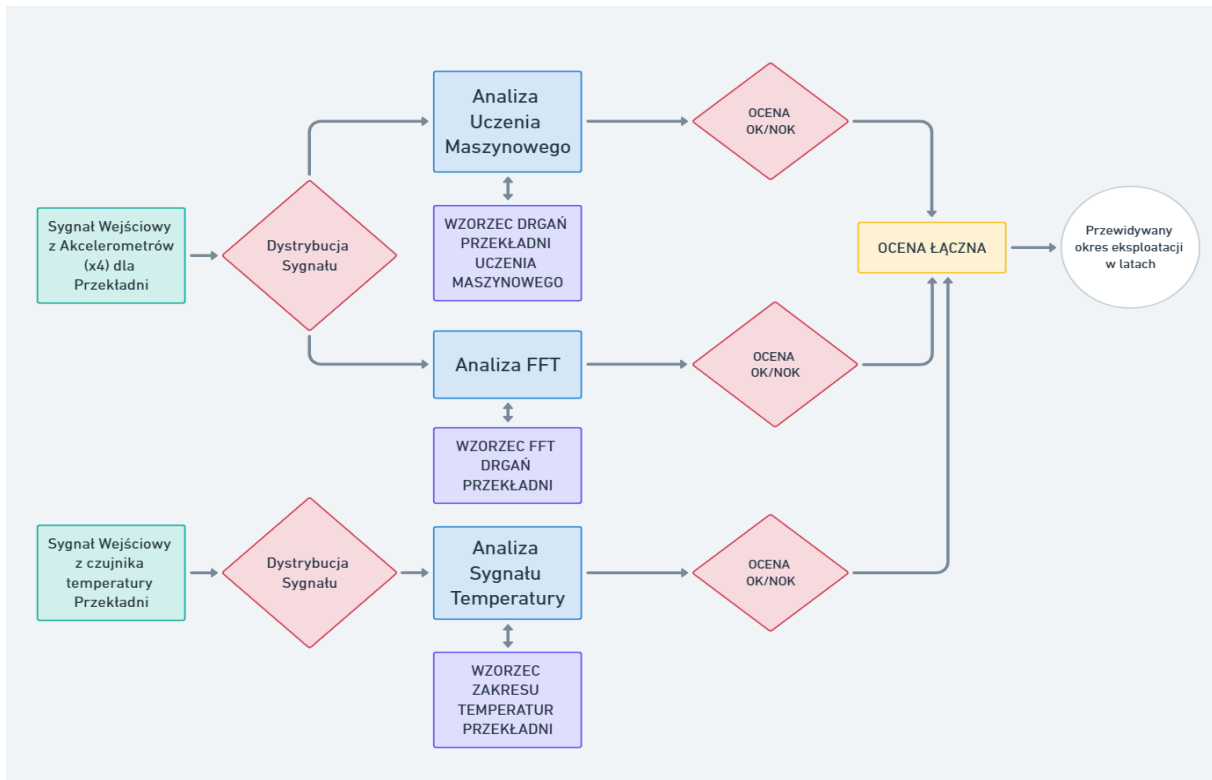
- drgania rejestrowane w 4 akcelerometrach wózka motorowego (zakres wzorcowy):

Prawidłowo → wzorzec → serwis [odchylenie standardowe] → max [dwa sigma]

Prawidłowo → wzorzec → [transformata FFT] → max [jedna trzecja + 1/4 amplitudy]

- temperatura przekładni < 150°

Rysunek 6.7 pokazuje algorytm oceny dla przekładni głównej napędowej. Algorytm wypracowuje ocenę stanu przekładni wózka motorowego do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania podzespołu.



Rys. 6.7. Algorytm oceny przekładni głównej.

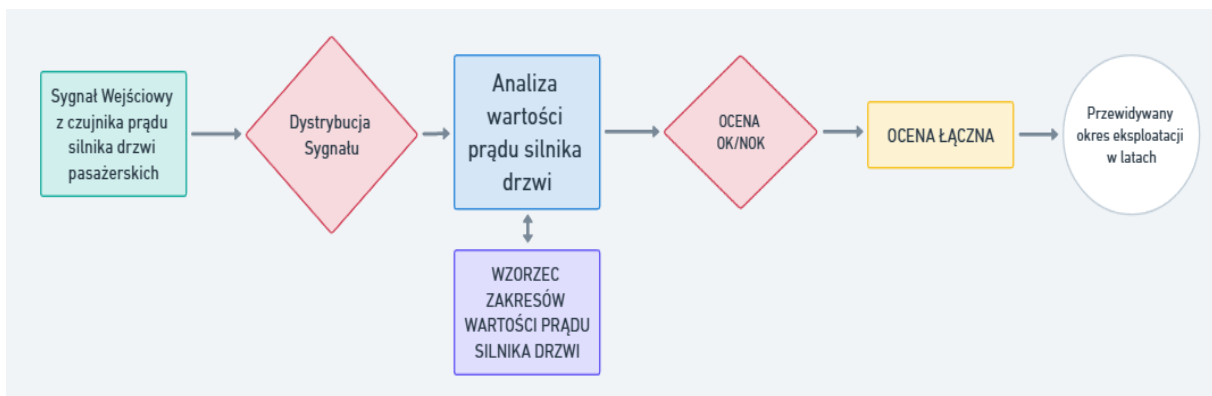
Źródło: opracowanie własne

Taki pomiar drgań i temperatury jest wykonywany on-line dla każdego z 8 przekładni.

G. drzwi pasażerskie

- zakres prawidłowy prądu silnika drzwi $> 1,8 [A] > 2,5 [A]$

Rysunek 6.8 pokazuje algorytm oceny dla drzwi pasażerskich. Algorytm wypracowuje indywidualną ocenę stanu każdego z drzwi i ich przydatności do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego użytkowania podzespołu.



Rys. 6.8. Algorytm oceny stanu drzwi pasażerskich.

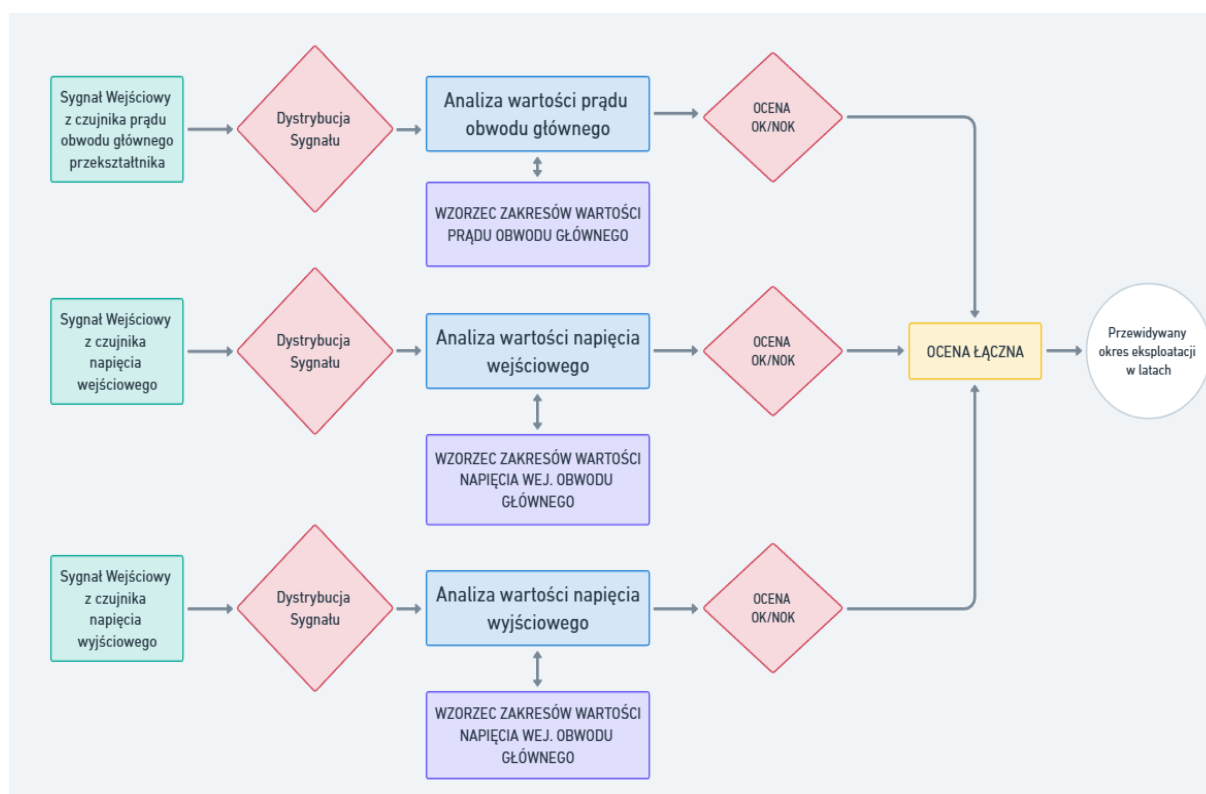
Źródło: opracowanie własne

Taki pomiar drgań i temperatury jest wykonywany on-line dla każdego z 48 modułów drzwi.

H. przekształtnik główny – układ napędowy

- prąd obwodu głównego < 1500 [A] DC
- napięcie wejściowe - 490 [V] DC \div 940 [V] DC
- napięcie wyjściowe 3×400 AC

Rysunek 6.9 pokazuje algorytm oceny dla przekształtnika głównego. Algorytm wypracowuje indywidualną ocenę stanu każdego z czterech przekształtników i ich przydatności do dalszej eksploatacji oraz predykcyjny czas prawidłowego ich użytkowania.



Rys. 6.9. Algorytm oceny stanu przekształtnika głównego.

Źródło: opracowanie własne

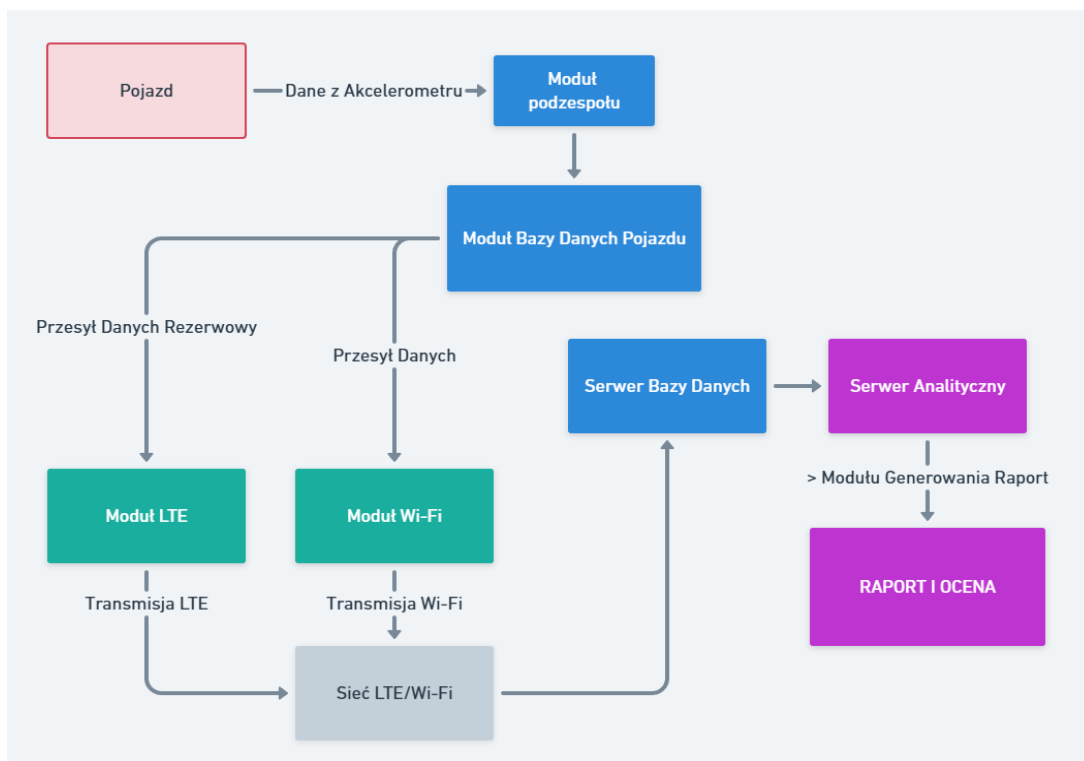
6.3. Proces przesyłania i analizy danych w centrum operacyjnym

System monitoringu stanu technicznego pojazdów będący podstawą oceny i predykcji zdolności podzespołów jest złożoną infrastrukturą technologiczną obejmującą czujniki, sieci transmisji danych, serwery oraz oprogramowanie analityczne. Na Rys.6.10 przedstawiono schemat blokowy architektury predykcyjnego systemu monitoringu stanu technicznego pojazdów.

Rys. 6.10 przedstawia sposób przepływu danych od czujników zamontowanych w konkretnych podzespołach pojazdu, przez moduły przetwarzające, po transmisję do Centrum Nadzoru Stanu Pojazdu (CNSP) wraz z unikalnym identyfikatorem umożliwiającym jednoznaczną identyfikację na każdym etapie przetwarzania.

Można to zapisać w następujący sposób:

1. **Czujniki** → 2. **Moduł Przetwarzania dla podzespołu** → 3. **Moduł bazy danych pojazdu** → 4. **Moduły komunikacyjne Wi-Fi/LTE** → 5. **Sieć tunelowa Wi-Fi/LTE** → 6. **Serwery CNSP** → 7. **Baza danych i analityka**.



Rys. 6.10. Architektura predykcyjnego systemu monitoringu pojazdów - rejestracji, przesyłu i analizy danych pomiarowych z pojazdu.

Źródło: opracowanie własne

Każdy podzespół pojazdu kolejowego wyposażony jest w zestaw elementów sensorycznych rejestrujących parametry eksploatacyjne poszczególnych podzespołów zakwalifikowanych do nadzoru i wymienionych w paragrafie 6.2, takich jak koło jezdne, oś zestawu kołowego, łożysko, rama wózka, przekładnia, zawieszenie, drzwi pasażerskie czy przekształtnik główny.

Czujniki zbierają dane, które są przesyłane do wewnętrznego systemu przetwarzającego lokalnie w module elektronicznym zainstalowanym dla danego podzespołu. Dane te

zawierające wartości sygnału mierzonego są zamieniane do postaci cyfrowej. Następnie jest im nadawany indeks identyfikacyjny i są przesyłane on-line przez sieć wewnętrzną pojazdu do bazy danych pojazdu. Są to sygnały przekształcone w formie cyfrowej, ale zawierające wartości zarejestrowane przez czujniki. Dane te są tymczasowo buforowane w pojeździe, a następnie, w regularnych odstępach czasu, przesyłane za pomocą sieci wewnętrznej sieci Wi-Fi do Centrum Nadzoru Stanu Pojazdu (CNSP).

System nie zbiera danych ze wszystkich możliwych sensorów w pojeździe, a jedynie z tej części, która służy do ustalenia stanu podzespołu oraz predykcji jego zdatności, tak aby ustalić czas pozostały zdatności z bezpiecznym zapasem pewności prognozy. Poza rejestrowanymi danymi w pojeździe występuje znacznie więcej danych, które są konieczne do jego prawidłowej pracy, ale nie są konieczne do ustalenia stanu podzespołu. Oznacza to, że system nie będzie realizował dowolnie szerokiej funkcji oceny stanu całego pojazdu, a jedynie ocenę kluczowych dla bezpieczeństwa elementów. Inne czynności utrzymaniowe, które ze swej natury nie mogą być wykonywane na bazie oceny i predykcji będą realizowane zgodnie z dotychczasową zasadą systemu planowo zapobiegawczego na bazie poziomów utrzymania od P1 do P5.

CNSP jest miejscem na Stacji Techniczno-Postojowej, gdzie zebrane dane są identyfikowane wg indeksu sygnału, agregowane oraz przetwarzane przez zaawansowane oprogramowanie. Oprogramowanie to dokonuje analizy kondycji każdego podzespołu na podstawie przyjętych kryteriów oraz metod analitycznych, przypisując oceny stanu podzespołu oraz oceny jego zdatności do dalszego użytkowania. Na tej podstawie generowany jest raport, który ocenia kondycję poszczególnych elementów, wskazuje czas, w którym należy przeprowadzić działania utrzymaniowe, oraz zaleca podjęcie odpowiednich działań naprawczych.

Każdy raport jest indywidualnie przypisywany do konkretnego pojazdu oraz odpowiedniego podzespołu poprzez unikalny numer identyfikacyjny, co pozwala na precyzyjną i systematyczną kontrolę stanu technicznego dużej floty pojazdów. Ten ogólny opis procesu rejestracji, przesyłania i analizy danych rejestrowanych w pojeździe składa się z poszczególnych etapów.

Przedstawiony system monitoringu stanu technicznego pojazdów to kompleksowa sieć zaawansowanych technologicznie elementów. Obejmuje ona wyspecjalizowane sensory, moduły przetwarzania, moduły pamięci, systemy przesyłania danych, serwery przetwarzające dane, a także oprogramowanie analityczne.

Poniżej przedstawiono opis poszczególnych elementów systemu. Opis ten przybliża szczegóły techniczne związane z każdym z tych elementów oraz przedstawia sposób ich użycia w celu uzyskania automatyzacji oceny stanu pojazdów.

Opis elementów systemu monitoringu stanu technicznego pojazdów:

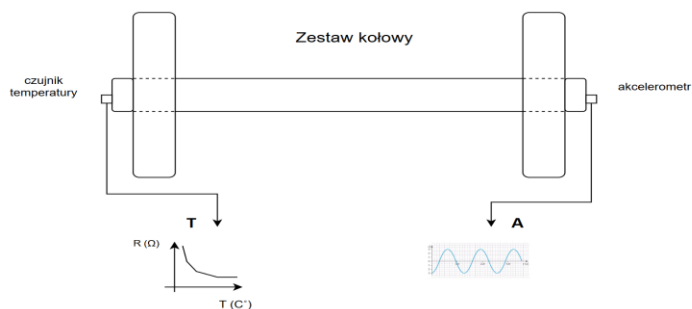
1. Rodzaje i Specyfikacja Czujników Stanu Technicznego

Czujniki odgrywają kluczową rolę w monitoringu poszczególnych podzespołów pojazdu. Każdy czujnik ma dedykowaną funkcję i monitoruje wybrane parametry. W zależności od charakterystyki działania podzespołów, stosuje się następujące typy czujników:

- Czujniki temperatury: Wykorzystują półprzewodnikowe elementy termistorowe (NTC/PTC) oraz termopary.
- Czujniki ciśnienia: Czujniki MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) stosowane są do monitorowania ciśnienia w układzie hamulcowym.
- Akcelerometry: Akcelerometry, takie jak np. opisywane MPU6050, umożliwiają pomiar przyspieszeń i wibracji, dostarczając informacji o kondycji łożysk czy też stanu kół.
- Czujniki napięcia i natężenia prądu: monitorują parametrów układu elektrycznego wielu urządzeń w tym parametry przekształtnika głównego.

Każdy z tych czujników jest odpowiednio skalibrowany do parametrów pracy danego podzespołu, tak aby zapewnić dokładność i wiarygodność pomiarów. Dane z czujników są przekazywane do jednostki przetwarzającej konkretnego podzespołu, która wykonuje wymagane przekształcenia i indeksacje. Dane cyfrowe są indeksowane dla identyfikacji pojazdu, konkretnego podzespołu, rodzaju danej. Natomiast dane analogowe są przekształcane do postaci cyfrowej i podobnie jak dane cyfrowe indeksowane i przesyłane do modułu bazy danych znajdującego się w pojeździe.

Przykładowo dla łożyska zestawu kołowego typowymi czujnikami determinującymi stan tego łożyska będzie czujnik temperatury i akcelerometr. Na rys. 6.11 przedstawiono w sposób schematyczny sygnały z czujnika np. PTC oraz akcelerometru. Sygnały z tych czujników są analogowe i w większości rozwiązań zmiennymi są napięcia w funkcji czasu, jednak charakter sygnału z czujnika temperatury (stabilny i wolno zmienny o zakresie od 0,5 [V] do 5 [V]) jest gruntownie inny niż sygnał z akcelerometru (szybko zmienny o częstotliwości od 3 [Hz] do 10 [kHz] i napięciu od 0,5 [V] do 10 [V] dla czujników 100 mV/g).



Rys. 6.11. Czujniki zestawu kołowego rejestrujące drgania i temperaturę.

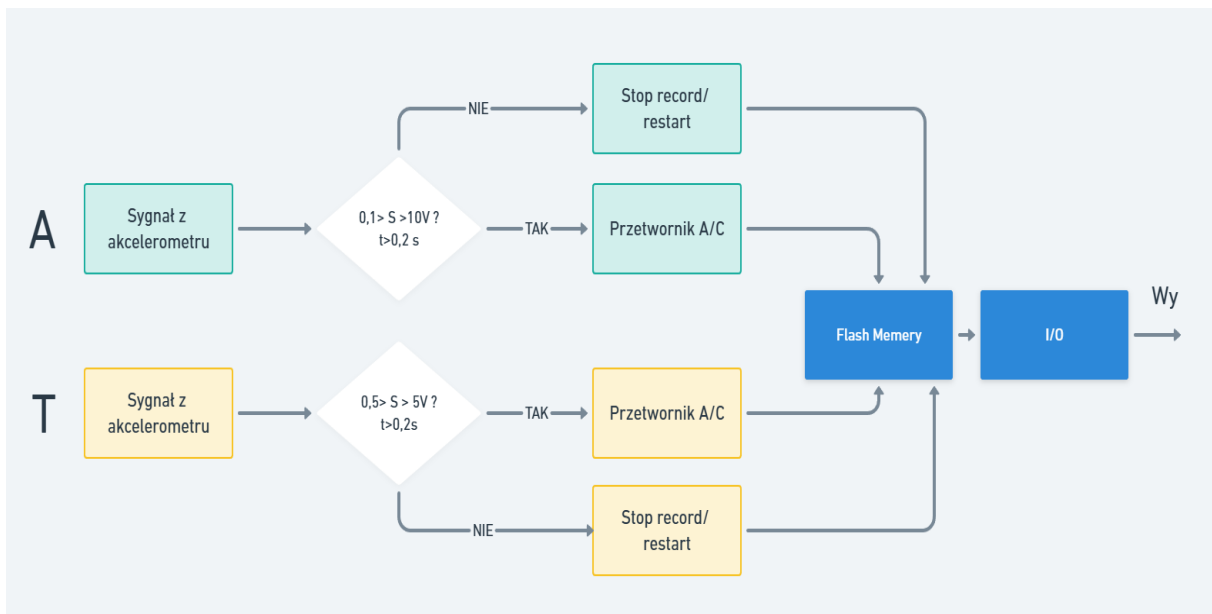
Źródło: opracowanie własne

2. Moduł Przetwarzania Danych Podzespołu

Moduł przetwarzania danych podzespołu (MPDP) jest punktem zbierania danych zarejestrowanych dla danego modułu pojazdu z wszystkich jego czujników. Jest on urządzeniem o wysokiej mocy obliczeniowej. Moduł ten pełni następujące funkcje:

- **Agregacja danych:** Dane z każdego czujnika są pobierane i odpowiednio oznaczane identyfikatorem oraz sygnaturą czasową. Moduł zbiera sygnały cyfrowe i analogowe z czujników, przekształca je (jeśli nie są cyfrowe) na dane cyfrowe za pomocą wbudowanych przetworników A/D (Analog-to-Digital).
- **Filtrowanie sygnałów:** Sygnały z czujników mogą być podatne na szумы i fluktuacje, dlatego wstępne przetwarzanie obejmuje filtrowanie danych. Stosuje się tutaj różne filtry cyfrowe (np. filtry dolnoprzepustowe i medianowe), które eliminują anomalie pomiarowe.
- **Buforowanie danych:** Moduł posiada wbudowaną pamięć np. typu flash, która umożliwia przechowywanie danych przez krótki okres, do czasu ich przesłania do modułu bazy danych pojazdu.
- **Wykrywanie błędów:** Moduł przetwarzania jest także zaprogramowany do wykrywania awarii czujników, co pozwala na automatyczne zgłaszanie problemów technicznych związanych z monitoringiem samych urządzeń pomiarowych.

Rys. 6.12 zawiera schemat działania przykładowego modułu przetwarzania danych pomiarowych dla łożyska maźnicy. Każdy podzespół zakwalifikowany do nadzoru w ramach systemu parametryczno-predykcyjnego zgodnie z analizą opisaną w rozdziale 6.2 powinien być wyposażony w moduł tego typu. Transmisja sygnałów cyfrowych pomiędzy modułami odbywa się poprzez klasyczną sieć LAN i protokół TCP/IP o prędkości 1 GB/s. Taka sieć jest stosowana w pojazdach typu Inspiro eksploatowanych w warszawskim metrze.



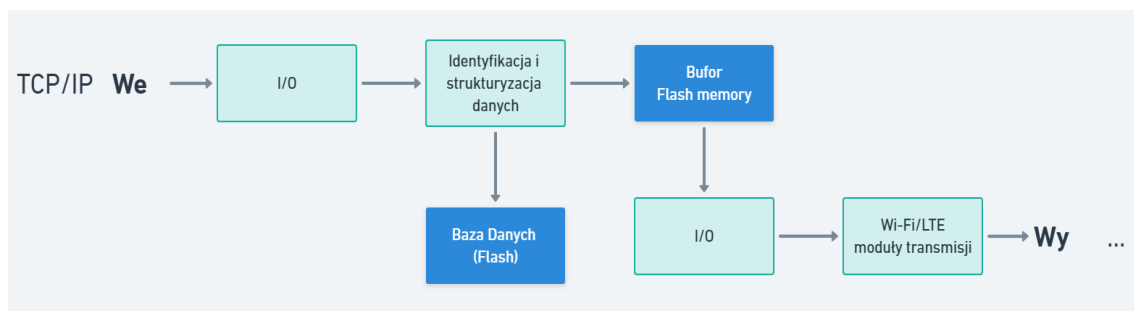
Rys. 6.12. Schemat działania modułu MPDP.

Źródło: opracowanie własne

3. Moduł Bazy Danych Pojazdu

Moduł, będący centralnym punktem zbierania danych w pojeździe z wszystkich jego czujników i modułów, jest mikroprocesorowym urządzeniem o wysokiej mocy obliczeniowej. Moduł ten pełni następujące funkcje:

- Agregacja danych: Dane z każdego modułu są pobierane i odpowiednio oznaczane identyfikatorem oraz sygnaturą czasową.
- Rejestracja danych: Moduł posiada wbudowaną pamięć RAM, która umożliwia zapisanie i przechowywanie danych przez dłuższy okres, do czasu ich nadpisania przez następne rejestrowane dane. Należy założyć, że dane takie powinny nie być nadpisywane przez co najmniej 48 godzin. Jest to szczególnie przydatne w sytuacjach, gdy z różnych powodów przesyłanie danych z pojazdu należy powtórzyć.



Rys. 6.13. Schemat działania lokalnej bazy danych.

Źródło: opracowanie własne

Dane odbierane z modułów MPDP poszczególnych podzespołów są identyfikowane i strukturalnie zapisywane w lokalnej Bazie Danych pojazdu (np. typu flash). Jednocześnie dane te są buforowane i przesyłane poprzez moduł transmisji danych Wi-Fi (Access Point) i sieć do stacjonarnej bazy danych w Centrum Nadzoru Stanu Pojazdu, gdzie dane są ponownie agregowane i przesyłane do analizy. Głównym kanałem transmisyjnym z pojazdu do CNSP jest sieć Wi-Fi, natomiast sieć komórkowa LTE, jest siecią rezerwową wykorzystywaną warunkowo w sytuacjach długotrwałej (np. 10 [s]) transmisji.

4. Moduły Transmisji Danych – LTE i Wi-Fi

Przesył danych do CNSP realizowany jest głównie za pomocą modułów komunikacyjnych Wi-Fi (Access Point AP), a w sytuacjach awaryjnych za pomocą modułu komunikacyjnego LTE. Zapewnia to dwie redundantne ścieżki transmisji. Każdy pojazd powinien być wyposażony w dwa podstawowe moduły komunikacyjne:

- Moduł LTE: Moduł LTE wykorzystujący standardy komunikacji mobilnej (np. LTE cat. 4 lub cat. 6) i umożliwiający przesył danych z prędkością dochodzącą do 150 Mbps.
- Moduł Wi-Fi: Wi-Fi jest alternatywnym kanałem komunikacyjnym i może działać w paśmie 2.4 GHz lub 5 GHz. Pojazd znajduje się w zasięgu stale dostępnej sieci Wi-Fi. Jeżeli z powodów technicznych nie jest możliwe przesłanie pakietu danych tą drogą, moduł automatycznie przełącza przesył danych z Wi-Fi na LTE, co pozwala na zmniejszenie kosztów transmisji. Moduły Wi-Fi są kompatybilne ze standardami 802.11 b/g/n.
- Zabezpieczenia Transmisji Danych: dane przesyłane z pojazdów do CNSP są zabezpieczone automatycznymi mechanizmami szyfrującymi. W celu zachowania integralności i poufności danych stosuje się w tym przypadku protokół TLS/SSL. Transmisja danych jest szyfrowana za pomocą protokołu TLS (Transport Layer Security) lub SSL (Secure Sockets Layer), co zapewnia ochronę przed przechwyceniem lub zafałszowaniem danych.

Droga przesyłu danych pomiędzy pojazdem a CNSP jest przedstawiona schematycznie na rysunku 6.10.

5. Centrum Nadzoru Stanu Pojazdu (CNSP) – Zaawansowana Architektura Serwerowa

CNSP jest centralnym ośrodkiem zarządzającym danymi przesyłanymi z floty pojazdów. W skład infrastruktury CNSP wchodzi serwery o dużej mocy obliczeniowej oraz specjalistyczne oprogramowanie analityczne.

- Serwery baz danych: Dane przesyłane z pojazdów są przechowywane w rozproszonych bazach danych SQL.
- Serwery analityczne: Dane przetwarzane są przez serwery analityczne wyposażone m.in. w algorytmy Machine Learning (ML) i modele predykcyjne, ale także systemy porównawcze wykorzystujące wartości referencyjne dla danego modułu. Wykorzystuje się, w tym przypadku, rozwiązania, które umożliwiają analizę dużych zbiorów danych i prognozowanie żywotności podzespołów.

6. Oprogramowanie Analityczne – Algorytmy i Kryteria Oceny Stanu Technicznego

Oprogramowanie analityczne stosowane w CNSP jest kluczowe dla oceny kondycji technicznej pojazdów. Bazuje na algorytmach m.in. Machine Learning i statystyce, aby analizować i prognozować kondycję podzespołów. Typowe algorytmy stosowane w tego typu analizie to między innymi:

- Drzewa decyzyjne: Algorytmy drzewa decyzyjnego klasyfikują stan techniczny na podstawie wcześniej określonych progów. Algorytm analizuje zmienne wejściowe (np. temperatura, ciśnienie, poziom wibracji) i przypisuje oceny.
- Sieci neuronowe i modele predykcyjne: Sieci neuronowe uczą się na historycznych danych i prognozują czas awarii lub konieczność przeprowadzenia serwisu. Modele te korzystają z danych historycznych, aby przewidywać zmiany w kondycji podzespołów.
- Modele progowe i regresji: W celu oceny bieżącego stanu komponentów stosuje się model progowy, który identyfikuje przekroczenia określonych wartości i przypisuje odpowiednią ocenę.

Oprogramowanie analityczne jest najważniejszym elementem CNSP i jest ono odpowiedzialne za analizowanie ogromnych ilości danych. Wykorzystuje modele statystyczne oraz progowe kryteria ustalania stanu technicznego urządzeń, przypisują oceny zgodnie z ustaloną skalą:

- Ocena stanu (1–5): Skala oceny stanu technicznego, gdzie wyższe wartości wskazują na lepszy stan techniczny.

- Ocena zdolności do użytkowania (1–5): Skala oceniająca przewidywaną zdolność (w jednostkach czasu) podzespołu.

Raport oceny technicznej tworzony przez oprogramowanie wskazuje kondycję poszczególnych elementów, konieczność przeprowadzenia napraw lub serwisowania oraz zalecany czas reakcji.

7. Ogólny schemat Torów Pomiarowych i Komunikacyjnych

Dla każdego z wyróżnionych w rozdziale 6.2 modułów pojazdu wyznaczono parametry charakteryzujące jednoznacznie stan tego elementu pojazdu. W rozdziale 6.4 przedstawiono formalny zapis elementów modelu systemu predykcyjnego, w tym parametrów diagnostycznych przyporządkowanych każdemu modułowi.

Ocena łączna przedstawiona równaniem 6.2 jest wskaźnikiem pomocniczym, jednak dla oceny pojazdu znaczenie ma każdy element poddany nadzorowi, ponieważ sprawność każdego z nich jest warunkiem *sine qua non* dopuszczenia pojazdu do dalszej eksploatacji. Z tego punktu widzenia, stan i zobrazowanie indywidualne każdego elementu, jest nie zaniedbywalnym elementem łącznej oceny stanu pojazdu i predykcji jego przydatności do dalszej eksploatacji.

6.4. Opis formalny modelu systemu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego

Dla potrzeb badań niezbędne jest identyfikacja wszystkich elementów modelu predykcyjnego utrzymania taboru szynowego. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdziale 5 oraz wcześniejszymi ustaleniami wymagań systemu predykcyjnego niezbędna jest identyfikacja danych dotyczących rodzaju danych zbieranych z sensorów, poziomu utrzymania, rodzaju taboru, stanu parametrów. Mając na uwadze powyższe model systemu predykcji można zapisać jako uporządkowaną piątkę postaci:

$$\mathbf{MOPTS} = \langle \mathbf{PB}, \mathbf{RZ}, \mathbf{PU}, \mathbf{KO}, \mathbf{MR} \rangle \quad (6.1)$$

gdzie:

PB – podzespoły badane i ich stan $\mathbf{PB} = \langle \mathbf{K}, \mathbf{O}, \mathbf{L}, \mathbf{Z}, \mathbf{R}, \mathbf{P}, \mathbf{D}, \mathbf{PG} \rangle$

Zbiory definiujące: **K** – koła zestawu; **O** – osie zestawu; **L** – łożyska maźnicy;

Z – zawieszania; **R** – ramy wózka, **P** – przekładnie główne; **D** – drzwi pasażerskie;

PG – przekształtniki główne

RZ – rodzaje zmiennych dla modułów pojazdu $\mathbf{RZ} = \langle \mathbf{V}, \mathbf{T}, \mathbf{I}, \mathbf{N} \rangle$

Zbiory opisujące V – drgania; T – temperaturę; I – prąd; N – napięcie;

Dane pomiarowe $V = \{v_d: d=1, \dots, V\}$ – d - źródło danych (różnych czujników);

$T = \{t_m: m=1, \dots, M\}$;

$I = \{i_p: p=1, \dots, P\}$;

$N = \{n_j: j=1, \dots, J\}$;

PU - poziomy utrzymania tj. $PU = \langle P1, P2, P3, P4, P5 \rangle$

P1 – przegląd podstawowy; P2 – przegląd rozszerzony; P3 – przegląd wyższy;

P4 – naprawa; P5 – naprawa główna

KO – metody oceny bazujące na zakresie wartości i zmienności parametrów rejestrowanych przez bazę danych $KO = \langle RL, TF, SN \rangle$

RL – regresja liniowa, TF – transformata Fouriera, SN – sieć neuronowa

MR – relacje między modułami i zmiennymi rejestrowanymi $\langle PB, RZ \rangle$

$MR = \{F(K, V), F(O, V), F(L, \{V, T\}), F(Z, V), F(R, V), F(PG, \{V, T\}), F(D, I), F(P, \{I, N\})\}$

Stan koła (K) -> drgania (V): $F(K, V) = \{(k, v) \mid k \in K, v \in V\}$

Stan osi zestawu kołowego (O) -> drgania (V): $F(O, V) = \{(o, v) \mid o \in O, v \in V\}$

Stan łożyska maźnicy (L) -> drgania (V) \cap temperatura (T):

$F(L, \{V, T\}) = \{(l, v, t) \mid l \in L, v \in V, t \in T\}$

Stan zawieszenia I stopnia (Z) -> drgania (V): $F(Z, V) = \{(z, v) \mid z \in Z, v \in V\}$

Stan ramy wózka (R) -> drgania (V): $F(R, V) = \{(r, v) \mid r \in R, v \in V\}$

Stan przekładni głównej (P) -> -> drgania (V) \cap temperatura (T):

$F(PG, \{V, T\}) = \{(pg, v, t) \mid pg \in PG, v \in V, t \in T\}$

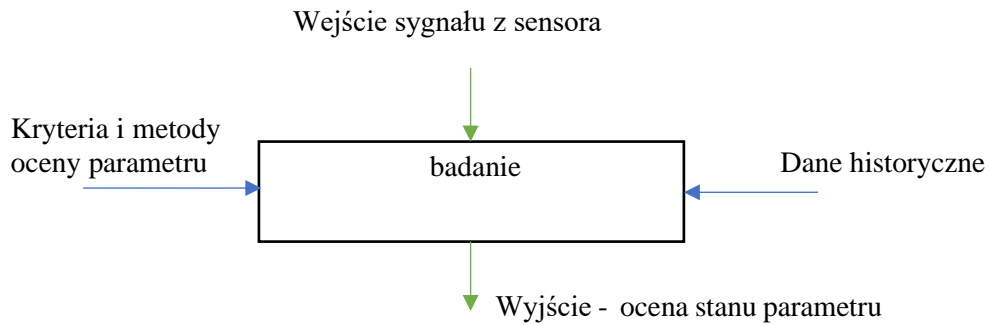
Stan drzwi pasażerskich (D) -> prąd (I): $F(D, I) = \{(d, i) \mid d \in D, i \in I\}$

Stan przekształtnika głównego (P) -> prąd(I) \cap napięcie(N):

$F(P, \{I, N\}) = \{(p, i, n) \mid p \in P, i \in I, n \in N\}$

MOPTS – model oceny i predykcji taboru szynowego

Ogólnie proces technologiczny oceny każdego z parametrów można zobrazować zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6.14. Proces oceny różni się w zależności od konkretnego parametru. Może on być także realizowany w różny sposób, w zależności od właściwości parametru i sposobu wypracowywania oceny, tak by właściwie odwzorować stan elementu pojazdu.



Rys. 6.14. Schemat oceny parametru wejściowego systemu
Źródło: opracowanie własne

Zgodnie z przedstawionym w rozdziale 5 schematem budowy modelu predykcyjnego podstawą do jego opracowania są dane. Co ważne zebrane dane powinny być możliwie jak najdokładniejsze. Kluczowe jest również właściwe ich przygotowanie i obrobienie, adekwatnie do sytuacji decyzyjnej. Powinny być przygotowane w taki sposób, aby użyty algorytm był w stanie je wykorzystać.

Jednym z ważnych elementów bazy danych w zakresie systemu utrzymania taboru kolejowego jest identyfikacja typu wykorzystywanego taboru wraz z jego charakterystykami. Z punktu widzenia realizacji rozprawy doktorskiej istotnymi będą dwa typy taboru: lokomotywy oraz wagony towarowe.

Pojazdy nadzorowane charakteryzowane są przez następujące parametry:

Parametr	Interpretacja
$nspoj$	numer fabryczny pojazdu: $NP = \{1, \dots, nspoj, \dots, NPOJ\}$
$n(poj)$	Numer inwentarzowy pojazdu o nr. $nspoj$
$lo(poj)$	liczba osi pojazdu szynowego nr. $n(poj)$
$lon(poj)$	liczba osi napędowych pojazdu o nr. $n(poj)$
$dl(poj)$	długość pojazdu szynowego nr. $n(poj)$
$cw(poj)$	ciężar własny pojazdu szynowego nr. $n(poj)$
$v(poj)$	prędkość maksymalna pojazdu szynowego nr. $n(poj)$
$pp(poj)$	pojemność pasażerska pojazdu szynowego nr. $n(poj)$

Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każdy pojazd nadzorowany opisany będzie wektorem **nspoj** parametrów tj.:

$$\mathbf{nspoj} = \begin{bmatrix} n(poj), lo(poj), lon(poj), dl(poj), \\ cw(poj), v(poj), pp(poj), \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Natomiast parametry pomiarowe podzespołów (modułów) charakteryzowane są przez parametry – zmienne rejestrowane według następującej reguły:

Parametr	Interpretacja
<i>npp</i>	numer podzespołu pojazdu : $NPP = \{1, \dots, npp, \dots, NPP\}$
<i>v(npp)</i>	drgania rejestrowane dla podzespołu nr. <i>npp</i>
<i>vt(npp)</i>	drgania po transformacji fouriera dla podzespołu nr. <i>npp</i>
<i>tp(npp)</i>	temperatura dla podzespołu nr. <i>npp</i>
<i>pr(npp)</i>	prąd dla podzespołu nr. <i>npp</i>
<i>np(npp)</i>	napięcie dla podzespołu nr. <i>npp</i>

Dla jednoznaczności dalszych rozważań przyjmuje się, że każdy podzespół będzie opisany wektorem **npp** parametrów tj.:

$$\mathbf{npp} = \begin{bmatrix} npp, v(npp), vt(npp), tp(npp), \\ pr(npp), np(npp) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Dla dalszych rozważań wprowadza się również identyfikacja poszczególnych podzespołów, które podlegają ocenie podczas kolejnych poziomów utrzymania. Numery badanych podzespołów pojazdów (modułów) zapisać można zbiorem postaci:

$$NPP = \{u: u= 1, \dots, U\}$$

przy czym, w rozprawie liczba *U* podzespołów wynosi 8 (*U*=8), a poszczególne podzespoły to:

- u* = 1 - koło jezdne
- u* = 2 - oś zestawu kołowego
- u* = 3 – łożysko maźnicy
- u* = 4 - zawieszenie I stopnia
- u* = 5 – rama wózka jezdnego
- u* = 6 – przekładnia główna
- u* = 7 – drzwi pasażerskie
- u* = 8 - przekształtnik główny

Ocena stanu *u*-tego podzespołu taboru kolejowego (modułu) zależy od *l*-tych parametrów, co można ogólnie zapisać funkcją postaci:

$$\mu_u(t) = f(P_{u,1(u)}(t), P_{u,2(u)}(t), P_{u,l(u)}(t), P_{u,l'(u)}(t), \dots, P_{u,L(u)}(t)) \quad (6.4)$$

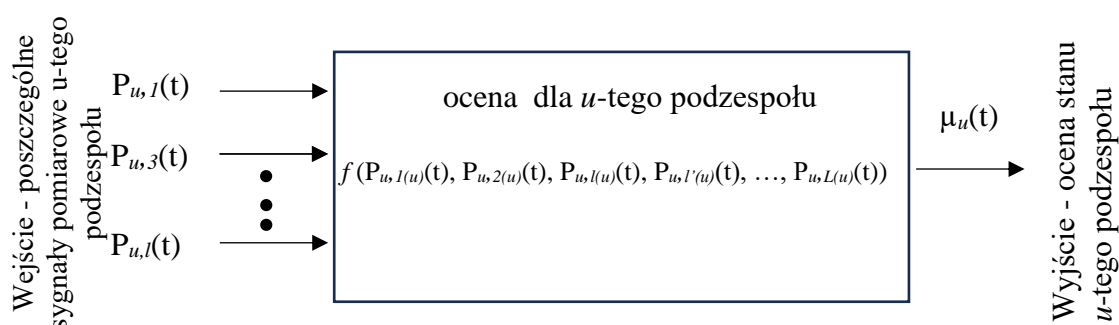
gdzie:

$\mu_u(t)$ – ocena stanu u -tego podzespołu pojazdu szynowego w funkcji czasu (t)

$P_{u,l(u)}(t)$ – ocena stanu l -tego parametru dla u -tego podzespołu w czasie (t) definiującego stan podzespołu pojazdu

Model pomiarowy dla pojedynczego elementu można opisać używając systemu symbolicznego.

Syntetyczny wskaźnik oceny pojedynczego modułu zapisano jak na rys. 6.15

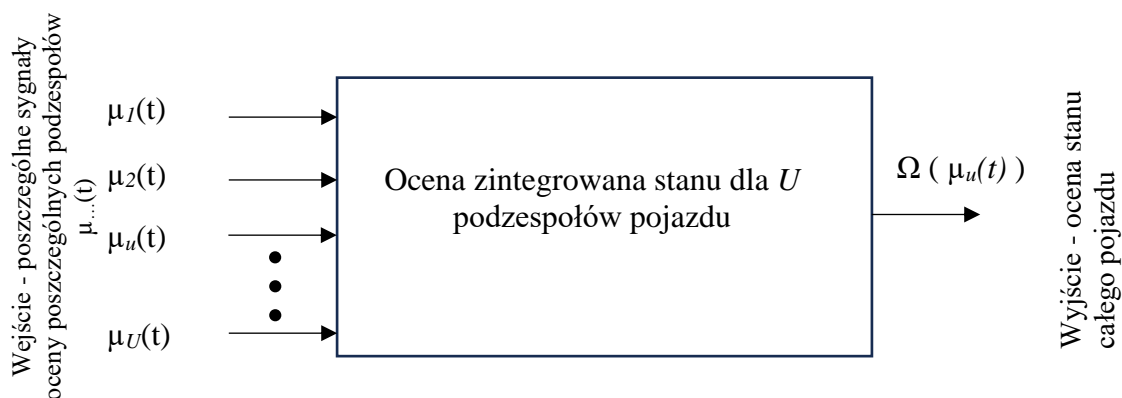


Rys.6.15. Struktura pomiarowa pojedynczego modułu pojazdu

źródło: opracowanie własne.

Ocena stanu całego pojazdu jest sumą stanów poszczególnych elementów pojazdu. Ocena każdego elementu w postaci $\mu_u(t)$ jest sumowana w module łącznym i przedstawia wynik oceny w postaci $\Omega(\mu_u(t))$, dla danej chwili czasowej. Model zintegrowanej oceny dla całego pojazdu taboru kolejowego przedstawiony na rys. 6.16.

Kompletny model dla wszystkich elementów pojazdu przedstawia się jak na rys. 6.16



Rys.6.16. Struktura pomiarowa dla całego pojazdu źródło: opracowanie własne.

Ocenę stanu u -tego modułu można przedstawić jako funkcję postaci:

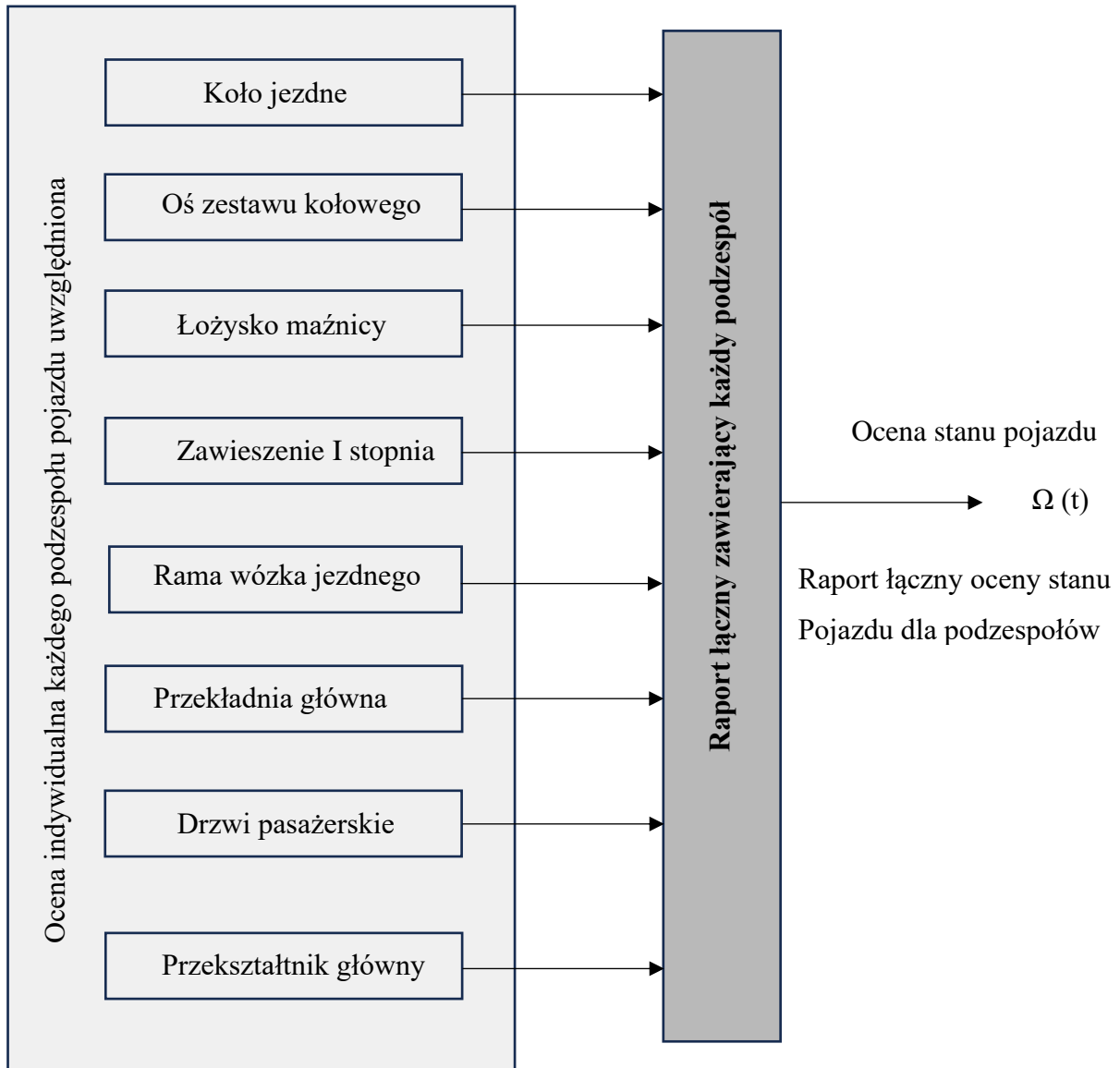
$$\Omega = f(\mu_1(t), \mu_2(t), \mu_u(t), \dots, \mu_n(t)) \quad (6.2)$$

gdzie:

Ω – ocena łączna stanu pojazdu na podstawie ocen poszczególnych podzespołów,

$\mu_u(t)$ – ocena stanu u -tego podzespołu pojazdu w czasie (t).

Uwzględniając powyższe modelem dokładniejszym jest schemat przedstawiony na rys. 6.17:

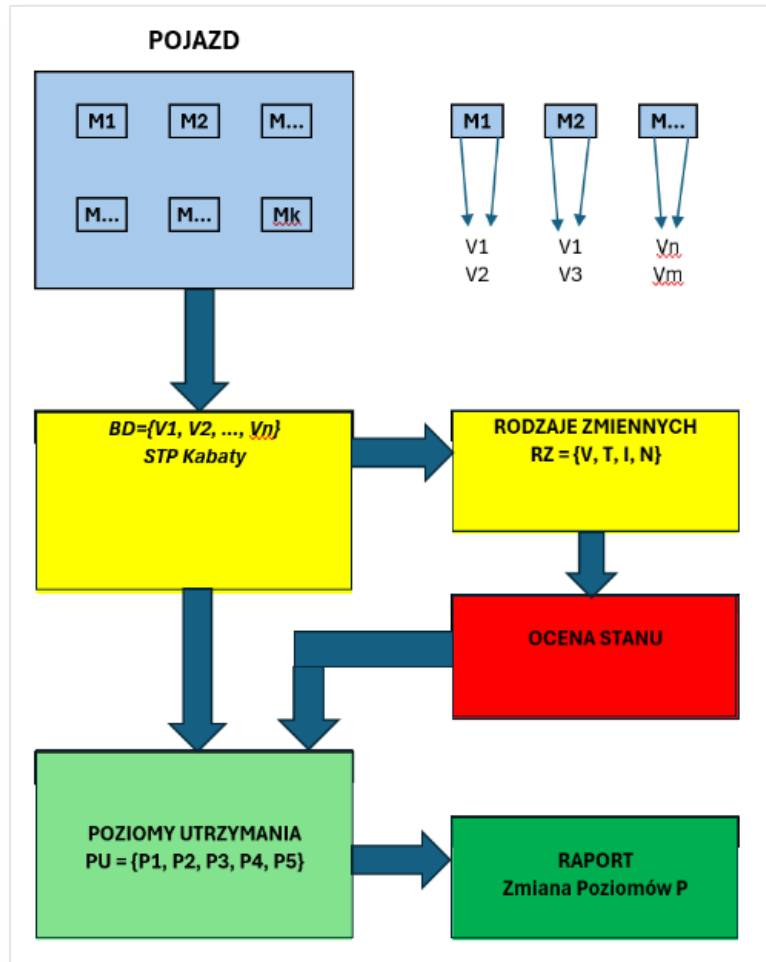


Rys. 6.17. Schemat struktury raportu łącznego dla podzespołów.

Źródło: opracowanie własne

Przedstawiony dotychczas proces oceny stanu modułów pojazdu składający się na łączną ocenę stanu całości procesu można przedstawić w postaci blokowej. Przebieg całego procesu,

tj. rejestracji parametrów dla poszczególnych modułów ich przesyłu do stacjonarnej bazy danych, analizy zarejestrowanych parametrów, a następnie prezentacji w postaci wyników będzie przedstawiony w postaci blokowej. Każdy z elementów schematu blokowego ma swoją logikę wewnętrzną, którą także można przedstawić w postaci schematycznej - Rys. 6.18



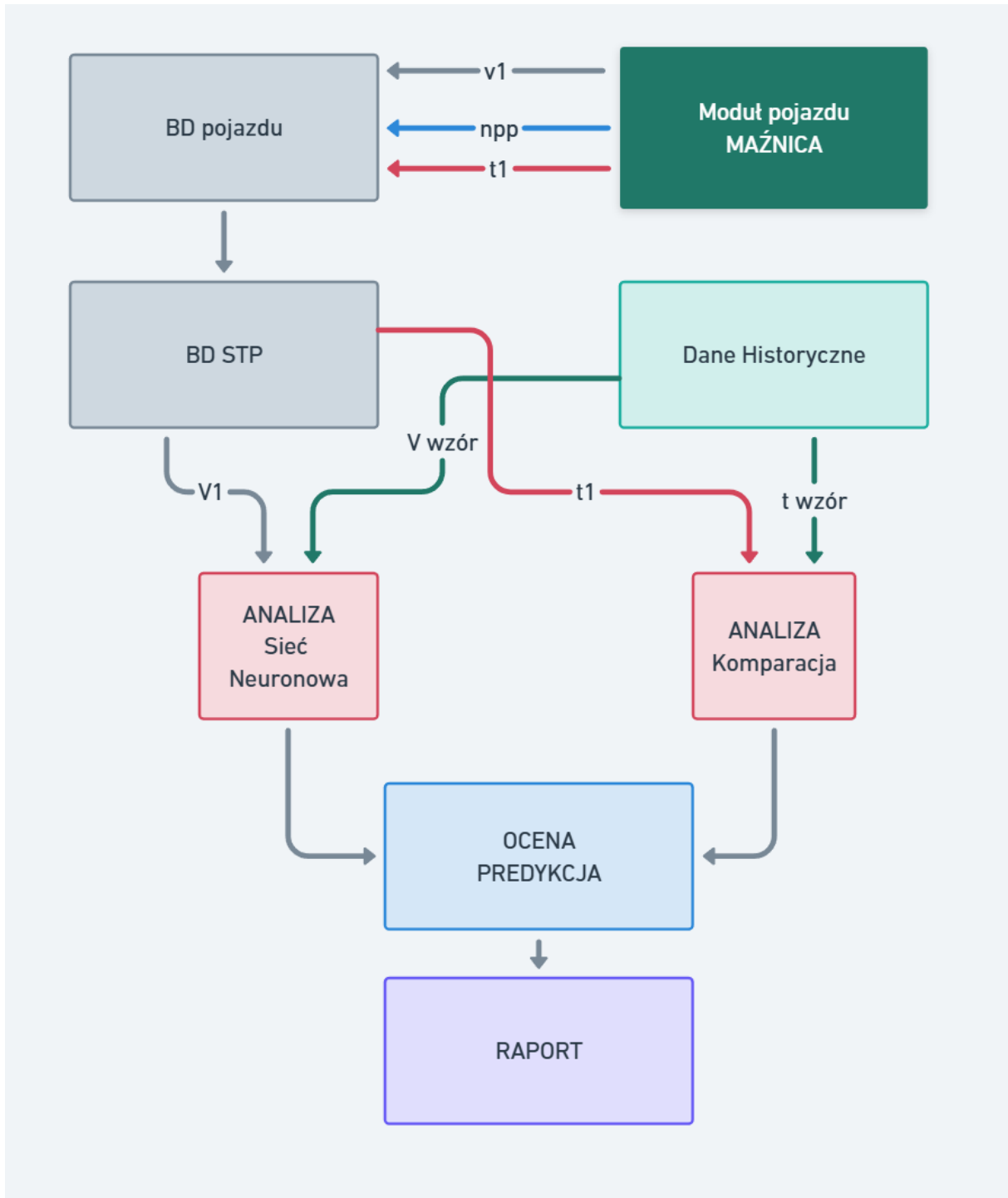
Rys. 6.18. Blokowy schemat procesu oceny stanu modułów.

Źródło: opracowanie własne

Blokowy przebieg procesu nie obrazuje najistotniejszych jego elementów takich jak rodzaj danych używanych w procesie i metoda analityczna prowadząca do wygenerowania oceny. Bardziej szczegółowy przebieg tych dwóch elementów został przedstawiony na Rys. 6.19.

Na podstawie dokonanej oceny i predykcji stanu maźnicy pojazdu jest przygotowywany raport dla użytkownika z sugestią przesunięcia czynności utrzymaniowych dla maźnicy np. z P4 na P5. Jest to proces bezpieczny, gdyż stan tej maźnicy jest nadzorowany stale, a dane pomiarowe są stale poddawane ocenie. Każda istotna zmiana oceny czy zmiana wskazań predykcyjnych będzie uwzględniona w raporcie i będzie widoczna znacznie przed wystąpieniem jakiegokolwiek zagrożenie zarówno w sensie technicznych jak też logistycznym.

Taki sposób utrzymania wszystkich istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu elementów jest wyraźnie najlepszy z punktu widzenia operacyjnego i znacznie bezpieczniejszy.



Rys. 6.19. Raport z oceny stanu i predykcji mażnicy zestawu kołowego.

Źródło: opracowanie własne

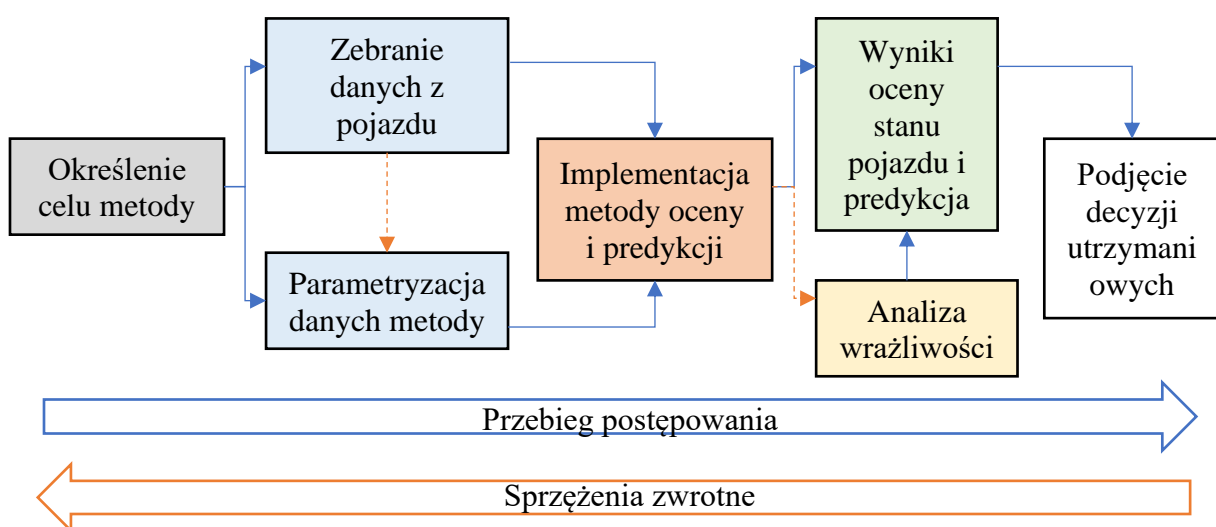
7. Procedura metody systemu predykcyjnego – algorytm oraz możliwości implementacji

7.1. Ogólny schemat procesu decyzyjnego

Jak zostało to zdefiniowane w rozdziale drugim celem niniejszej pracy jest: „*Opracowanie systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem technologii elektronicznych i informatycznych dla transmisji danych on-line na potrzeby oceny technicznej istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji części elementów pojazdów użytkowanych przez metro*”.

Proces tworzenia takiego systemu można podzielić na kilka generalnych faz, z której najistotniejszą jest **metoda oceny stanu pojazdu i predykcja** jego zdatości do eksploatacji w ściśle określonej przyszłości, tak aby biorąc pod uwagę tę wiedzę optymalizować czynności utrzymaniowe zgodnie z wymogami technicznymi funkcjonowania pojazdu i jego podzespołów. Takie potrzeby utrzymaniowe dla każdego podzespołu zdefiniowane w DSU, określone przez producenta pojazdu w trakcie jego projektowania są planowane z istotnym, czasem nawet ponad dwukrotnym zapasem bezpieczeństwa. Wykorzystanie proponowanej metody oceny i predykcji pozwoli na bezpieczną zmianę tych przewidywać zgodnie z optymalnymi warunkami wykorzystania pojazdu i jego podzespołów.

W uproszczeniu metodę oceny i predykcji można przedstawić schematycznie jak na Rys. 7.1.



Rys. 7.1. Ogólny schemat procesu decyzyjnego w oparciu o model oceny i predykcji stanu
źródło: opracowanie własne.

7.2. Algorytm postępowania

Jak zostało to opisane system jest zaprojektowany w sposób selektywny. Ograniczono zakres gromadzonych danych tylko do tych danych, które mają bezpośrednie znaczenie dla ustalenia i monitorowania stanu technicznego wyznaczonych podzespołów pojazdu oraz predykcji ich dalszej zdolności utrzymaniowej. Podstawowym jego celem jest zapewnienie wiarygodnej oceny stanu i pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji określonych podzespołów pojazdu, przy uwzględnieniu odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa ocenie dalszej zdadności. Pozwala to na podejmowanie działań prewencyjnych w optymalnym czasie, umożliwiając lepsze wykorzystanie potencjału sprawności tych elementów.

Należy podkreślić, że pojazd generuje wiele innych danych niezbędnych do jego prawidłowego funkcjonowania, jednak dane te nie są istotne dla diagnostyki podzespołów, które system obejmuje swoim działaniem.

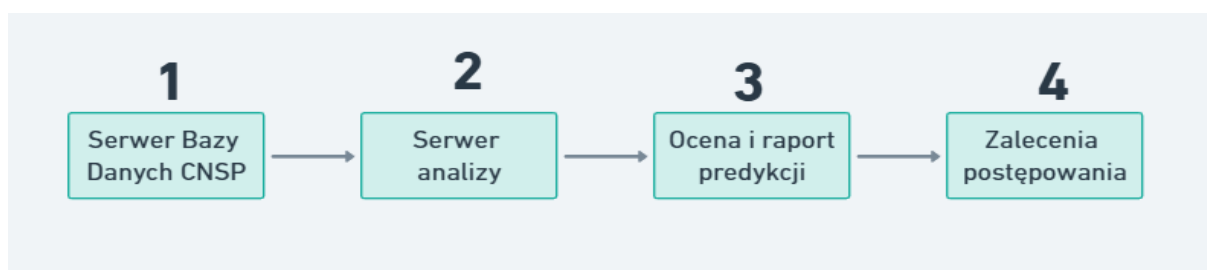
Funkcjonalność systemu została celowo ograniczona do elementów krytycznych z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkownika. Dzięki temu podejściu możliwe jest skoncentrowanie zasobów i mocy obliczeniowej na najbardziej istotnych komponentach, co zwiększa skuteczność działania i precyzję analiz. Jednocześnie pozostałe czynności związane z utrzymaniem technicznym pojazdu, które nie są krytyczne ze względu na ocenę bezpieczeństwa eksploatacji, są realizowane zgodnie z tradycyjnymi zasadami utrzymania czyli w systemie planowo zapobiegawczym. System w takich przypadkach wykorzystuje wcześniej ustalone poziomy utrzymania technicznego, oznaczone od P1 do P5, które w DSU definiują zakres działań oraz ich częstotliwość i okresy czasowe, zapewniając sprawne funkcjonowanie całego pojazdu w ramach dotychczasowych standardów utrzymania.

Jak przedstawiono na Rys. 7.1 wynikiem działania systemu jest sprzężenie zwrotne informacji wpływające na proces utrzymania.

W dotychczasowej części niniejszej rozprawy, szczególnie w rozdziale 2, 4 i 5, określono założenia i sposób działania systemu czyli zdefiniowano i opisano co jest przesłanką do podjęcia badań. W rozdziale 6.2 zdefiniowano zakres podzespołów mający największy wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji pojazdu. Następnie zdefiniowano dla każdego z tych podzespołów zbiory danych, które są niezbędne do zdefiniowania stanu pojazdu oraz przedstawienia prognozy zdadności do eksploatacji. W rozdziale 6.2 dokonano także parametryzacji zakresów prawidłowych otrzymywanych danych i wstępnie zdefiniowano metody ich analizy. W rozdziale 6.3 opisano metodę wytworzenia przesyłania do centrum nadzoru i agregacji danych zarówno na pojeździe jak też w Centrum Nadzoru Stanu Pojazdu.

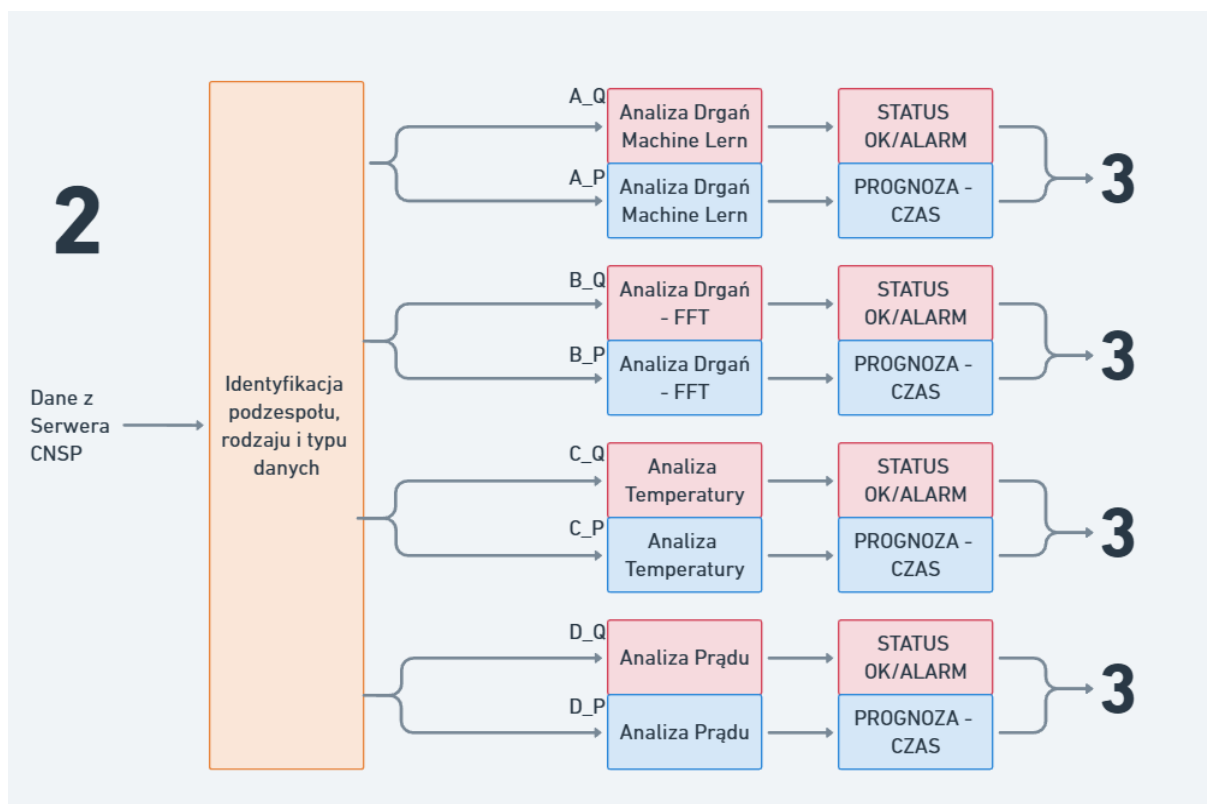
W niniejszej części rozprawy przedstawiona zostanie szczegółowo implementacja metody oceny i predykcji zapasu zdatności. Jest to zasadniczy etap dotyczący algorytmu działania systemu i sposobu opracowania wyników jego działania zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 6.10. Jest to też część procesu opisana schematycznie na Rys.6.10 jako „Serwer Analityczny” i dalej „Raport i Ocena”.

Zgodnie z przyjętą metodą przebieg procesu analitycznego od miejsca agregacji danych do wyniku raportu i zalecenia postępowania jest zgodny ze schematem przedstawionym na Rys.7.2.



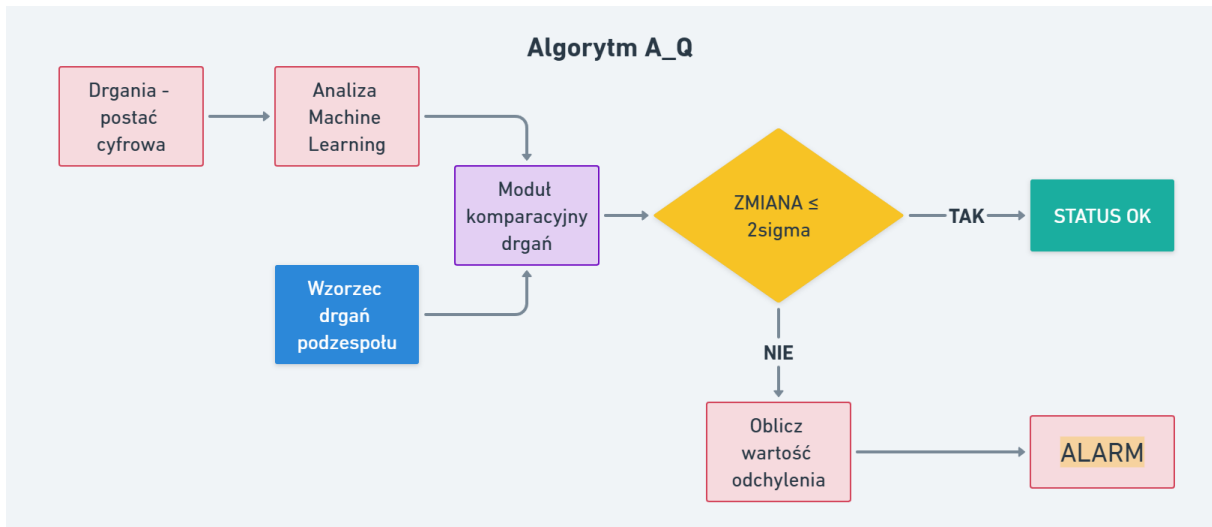
Rys. 7.2. Schemat przebiegu procesu analitycznego. *źródło: opracowanie własne.*

Najważniejszym elementem tego procesu jest punkt 2 czyli serwer analizy. Jest to system złożony, którego budowa została przedstawiona na Rys.7.3



Rys. 7.3. Główny moduł serwera analitycznego – 2.
źródło: opracowanie własne.

Serwer analityczny otrzymuje sygnały z serwera danych CNSP, a następnie kieruje je do poszczególnych modułów analitycznych oceniających stan modułu i prognozujących zapas zdatności dla tego modułu. Każdy z modułów od A_Q (drgania-jakość) do D_P (prąd-prognoza) wykonuje ocenę analityczną w zależności od przyjętych w rozdziale 6.2 kryteriów i porównania ze wzorcem lub wartością sygnału w zależności od podzespołu i typu sygnału. Szczegółowe algorytmy oceny przedstawiają rysunki od 7.4 do 7.12.

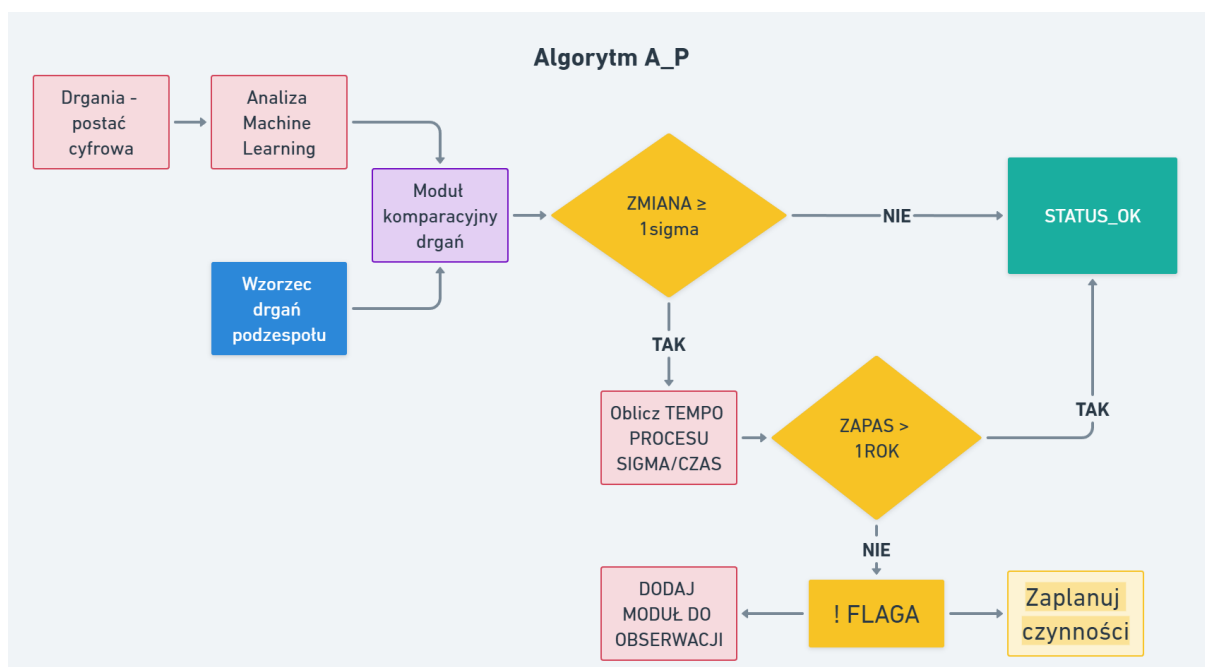


Rys. 7.4. Algorytm analizy drgań A_Q metodą Machine Learning.
źródło: Opracowanie własne.

Algorytm wykorzystuje systemy Machine Learning, uczy się prawidłowych wzorców i wychwytuje zmiany we wzorcach rejestrowanych on-line z pojazdów. Jeżeli sygnał nie przekracza 2σ to status oceny jest ok.

Natomiast jeżeli zmiana pomiędzy wzorcem, a sygnałem rejestrowanym on-line jest większa niż 2σ , szczególnie jeśli pojawi się to nagle, status zmienia się na alarmowy, co pociąga za sobą stosowne działania ze strony obsługi systemu i pociąg zostaje wycofany z eksploatacji i poddany ocenie ze szczególnym uwzględnieniem tego elementu.

W wyniku takiej procedury wyraźnie podniesiony jest poziom bezpieczeństwa eksploatacji, ponieważ każda anomalia jest natychmiast wychwytywana. Jeżeli jest to usterka sygnału czyli błąd czujnika to jest to wychwytywane na wcześniejszym etapie, tj. w module bezpośrednio zbierającym dane z konkretnego podzespołu. Taki proces jest zilustrowany na Rys. 7.4. Jeżeli nie został zarejestrowany sygnał błędny i wartość przekracza założone ramy odchylenia standardowego to sygnał alarmowy obliuguje obsługę do podjęcia stosownych działań.



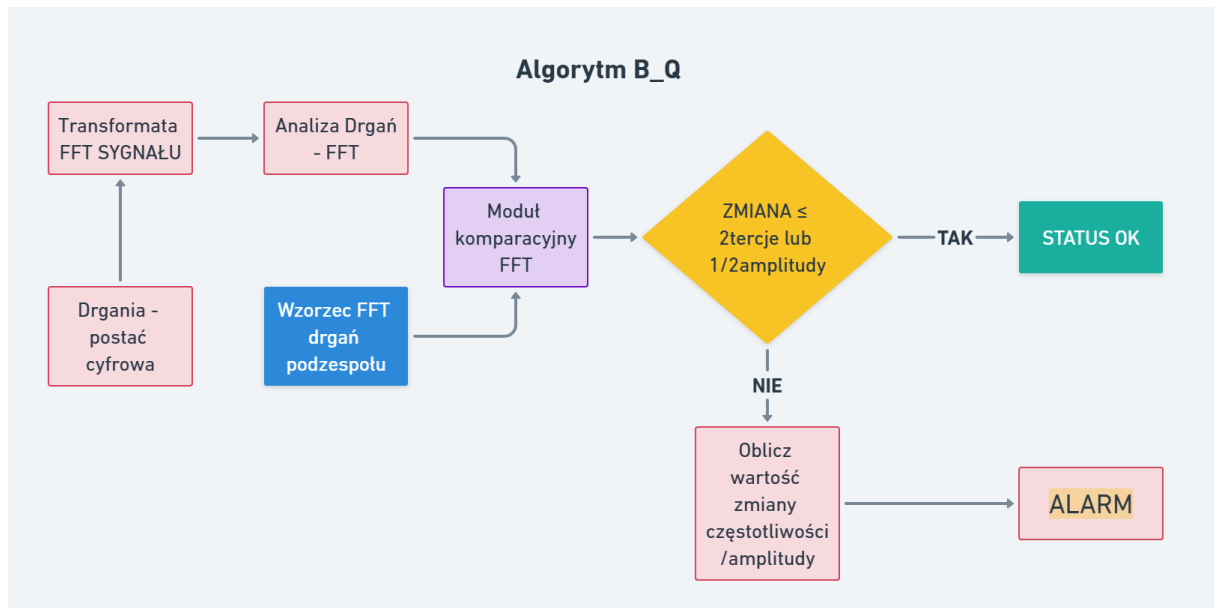
Rys. 7.5. Algorytm analizy tempa zmian drgań **A_P** metodą Machine Learning.
źródło: Opracowanie własne.

Rys. 7.5 obrazuje algorytm modułu A_P, który wykorzystuje metodę Machine Learning. Działanie modułu polega na ocenie tempa zmian sygnału drgań w porównaniu ze wzorcem. Element obliczający tempo zmian uwzględnia wartość przyrostu odchylenia w jednostce czasu. Przyjmując obliczone tempo zmian ocenia pozostały okres zdatności podzespołu pojazdu do dalszej eksploatacji. Jeżeli obliczony w ten sposób czas pozostały zapas zdatności podzespołu jest mniejszy niż rok system ustawia żółtą flagę i dodaje moduł do obserwacji oraz do zbioru planowania czynności utrzymaniowych.

Biorąc pod uwagę fakt, że określone podzespoły pojazdu występują w ilości większej niż jeden system oczekuje na kumulację co najmniej 30-40% podzespołów takiego pojazdu planując jednocześnie czynności obsługowe. Jeżeli nie nastąpi przewidywana kumulacja, system sugeruje wymianę tego podzespołu na zamienny na tym pojeździe.

Algorytm wykorzystuje metodę analizy drgań opartą na transformacji Fouriera (FFT), która umożliwia przekształcenie sygnałów rejestrowanych on-line z pojazdów z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości (Rys.7.6). Taki proces pozwala na dokładne zidentyfikowanie charakterystycznych częstotliwości drgań, które określają prawidłowe działanie podzespołu i jednocześnie pozwalają zidentyfikować anomalie. Ocena stanu podzespołu odbywa się

poprzez porównanie wyników transformaty FFT ze wzorcem dla danego podzespołu w dziedzinie zarejestrowanym w warunkach prawidłowej pracy podzespołu.



Rys. 7.6. Algorytm analizy drgań **B_Q** metodą transformaty FFT.

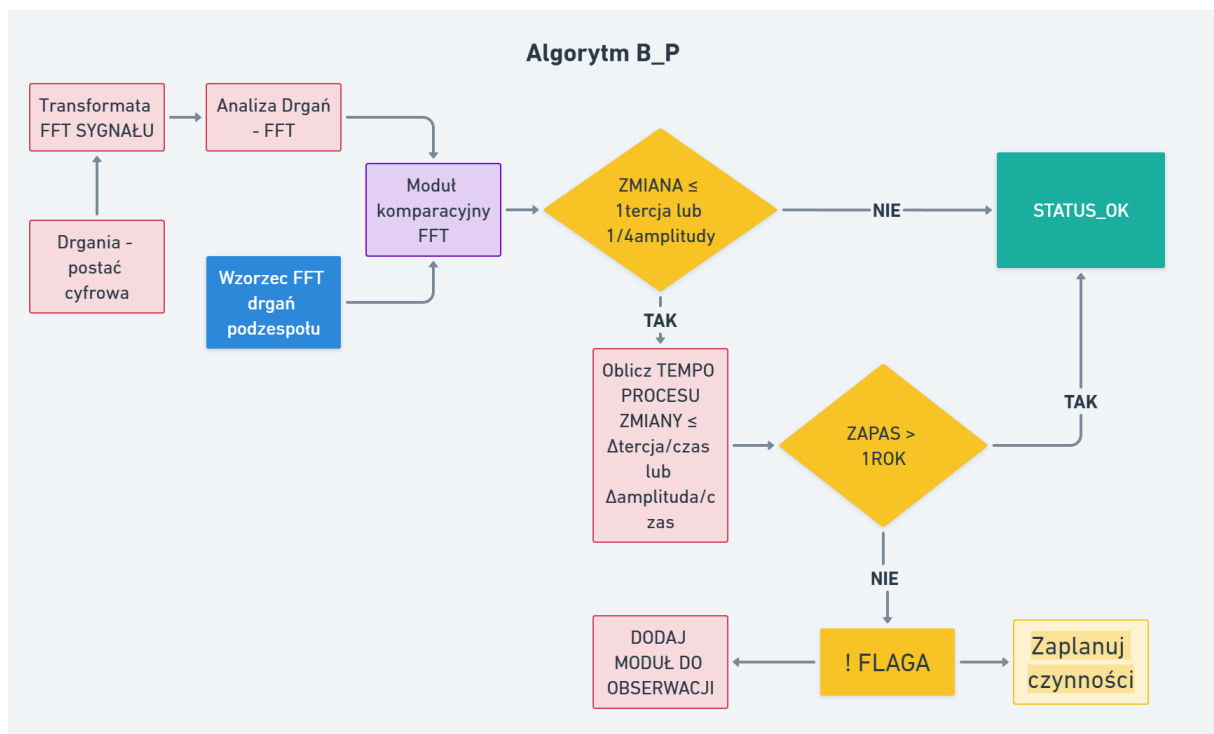
źródło: Opracowanie własne.

Jeżeli analiza wykazuje, że amplituda sygnału nie przekracza ustalonych progów granicznych (nie wykracza poza dwa odchylenia standardowe), status działania systemu pozostaje w normie. Natomiast, gdy amplituda w określonym zakresie częstotliwości przekroczy zdefiniowany próg alarmowy lub dla danej częstotliwości amplituda się nie zmienia, ale istotnej zmianie ulegnie częstotliwość sygnału, to zostanie wygenerowany sygnał ostrzegawczy. W przypadku nagłej zmiany system natychmiast przełącza status na alarmowy, co wymusza podjęcie działań przez obsługę. W przypadku potwierdzenia przekroczenia dopuszczalnych wartości drgań przez analizę FFT podejmowane są odpowiednie działania techniczne, mające na celu eliminację źródła anomalii.

Zastosowaniu tego algorytmu transformaty FFT pozwala na skuteczne identyfikowanie stanów uszkodzeń i ich potencjalnych przyczyn, takich jak zużycie elementów mechanicznych czy poważniejsze uszkodzenia strukturalne.

Algorytm przedstawiony na rysunku 7.7 wykorzystuje metodę analizy drgań podzespołu pojazdu za pomocą transformaty FFT (Fast Fourier Transform) do oceny tempa procesu zmian. Algorytm przyjmuje sygnał w postaci cyfrowej i następnie wynik analizy FFT porównywany jest z wzorcem drgań zapisanym wcześniej dla prawidłowego stanu technicznego tego samego

podzespołu. Moduł komparacyjny, który porównuje te dwa sygnały, bada różnice w amplitudzie i częstotliwości.



Rys. 7.7. Algorytm analizy zmian tempa drgań **B_P** metodą transformaty FFT.

źródło: Opracowanie własne.

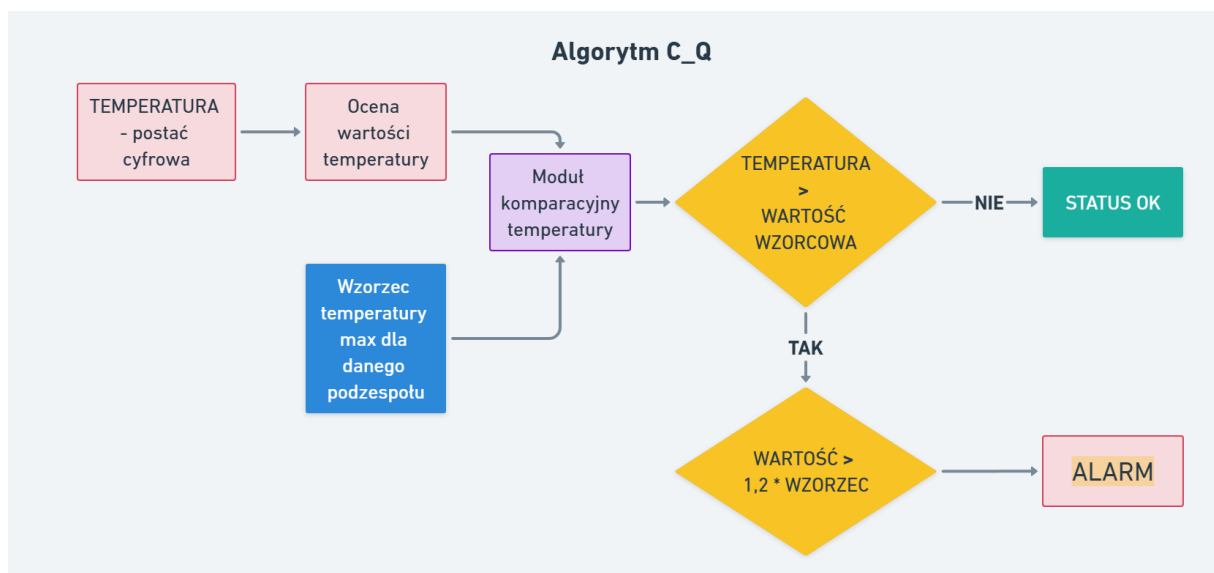
Gdy zmiana w porównaniu do wzorca jest nieznaczna lub jej nie ma, tj. mieści się w zakresie dopuszczalnych odchyłek (1/3 częstotliwości i poniżej wartości 1/4 amplitudy), algorytm przyznaje status „OK”, oznaczający brak konieczności podejmowania dodatkowych działań. W przypadku wykrycia większej zmiany, przekraczającej dopuszczalną tolerancję, algorytm przechodzi do kolejnego kroku, w którym obliczane jest tempo zmian tej różnicy, uwzględniając przyrost odchyłki częstotliwości lub amplitudy w funkcji czasu.

Następnie algorytm ocenia przebieg tego procesu, tj. ocenia czy zapas czasu zdatności. Jeśli pozostały czas użytkowania szacowany na podstawie tempa zmian przewiduje, że podzespół będzie funkcjonował poprawnie przez co najmniej rok, utrzymywany jest status „OK”. Natomiast jeśli prognozowany okres eksploatacji jest krótszy, system przyznaje sygnał ostrzegawczy („flaga”) i dodaje ten moduł do monitorowania. Flaga ta wskazuje na konieczność dokładniejszej obserwacji podzespołu oraz włączenie go do planu działań prewencyjnych.

System sugeruje przeprowadzenie naprawy lub wymiany podzespołu, szczególnie jeśli więcej niż jeden moduł tego typu wykazuje podobne oznaki zużycia. Podejście to pozwala na optymalne zarządzanie zasobami i synchronizację działań serwisowych, tak aby minimalizować czas przestoju pojazdu i ograniczać ryzyko nagłej awarii.

Dzięki zastosowaniu analizy FFT, algorytm jest w stanie precyzyjnie wykrywać i monitorować zmiany w drganiach podzespołów, co znacząco zwiększa bezpieczeństwo oraz efektywność eksploatacyjną.

Algorytm wykorzystuje metodę komparacji do oceny stanu technicznego podzespołu na podstawie sygnałów temperatury pracy rejestrowanych on-line na pojeździe (Rys. 7.8). Proces ten opiera się na porównaniu bieżących wartości temperatury z wcześniej zdefiniowaną wartością graniczną. Wzorzec dla poszczególnych podzespołów został opracowany na podstawie danych technicznych pracy danego podzespołu.



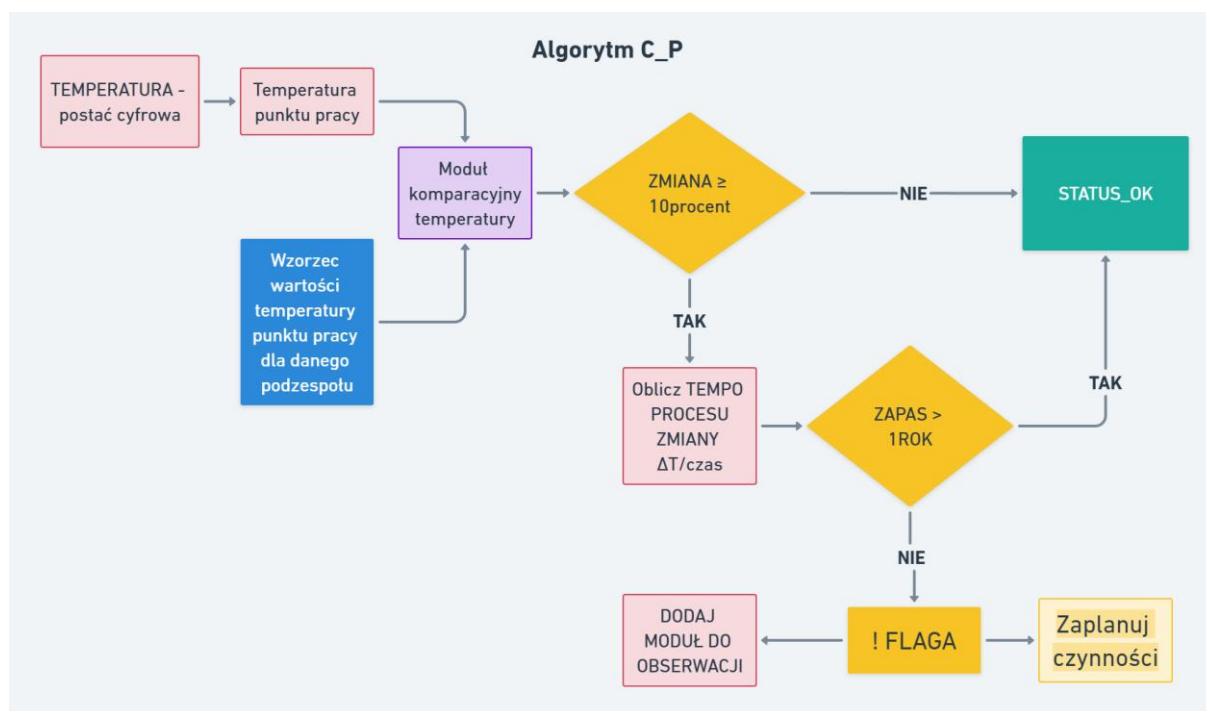
Rys. 7.8. Algorytm C_Q oceny stanu temperatury pracy podzespołu metodą komparacji.

źródło: Opracowanie własne.

Jeżeli bieżąca temperatura mieści się w dopuszczalnym zakresie, status oceny pozostaje oznaczony jako „STATUS OK”. W przypadku aktywacji alarmu, algorytm inicjuje procedurę wycofania pojazdu z eksploatacji i przeprowadzenie bezpośrednich działań diagnostycznych.

Dzięki zastosowaniu metody komparacji system podnosi bezpieczeństwo eksploatacji, umożliwiając wczesne wykrywanie anomalii związanych z przekroczeniem dopuszczalnej dla danego podzespołu temperatury pracy. Takie podejście pozwala na szybką reakcję i ograniczenie ryzyka większych uszkodzeń spowodowanych niewłaściwymi warunkami termicznymi, przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności utrzymania technicznego pojazdu.

Algorytm przedstawiony na rysunku 7.9 jest oparty na metodzie komparacji i służy do monitorowania oraz oceny tempa zmian temperatury pracy podzespołu.



Rys. 7.9 Algorytm oceny tempa zmian temperatury **C_P** metodą komparacji.

źródło: Opracowanie własne.

Podstawowym celem algorytmu jest zapewnienie, że temperatura pracy mieści się w bezpiecznych granicach dla danego podzespołu, zanim wpłynie ona na sprawność jego funkcjonowania. Analiza ta opiera się na porównaniu wartości temperatury pracy podzespołu mierzonej on-line z wyznaczonym wzorcem temperatury charakterystycznym dla prawidłowej pracy podzespołu.

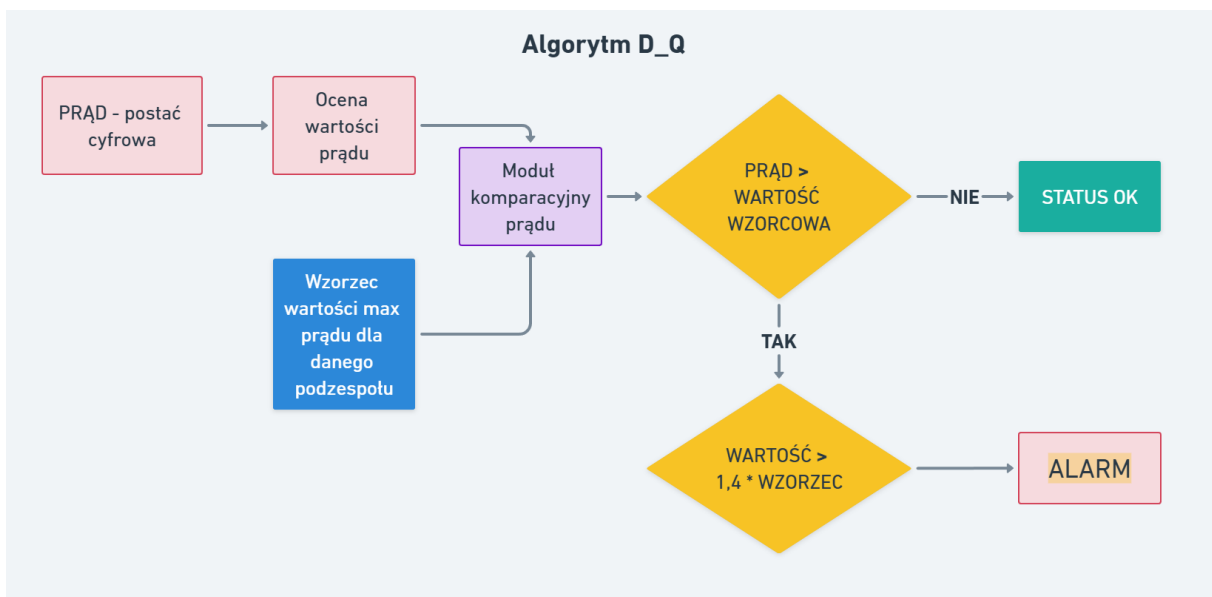
Proces rozpoczyna się od przetworzenia sygnału temperatury, który jest rejestrowany w formie cyfrowej. Następnie bieżąca wartość temperatury pracy jest porównywana z wzorcowym profilem temperatury normalnej pracy dla danego podzespołu w module komparacyjnym. Jeśli różnica między aktualną wartością a wzorcem jest mniejsza niż 10%, algorytm klasyfikuje stan podzespołu jako „STATUS_OK”, co oznacza, że nie są wymagane żadne dodatkowe działania.

Gdy różnica przekracza próg 10%, algorytm przechodzi do analizy tempa zmian tej wartości. W tej fazie obliczane jest tempo przyrostu temperatury ($\Delta T/\text{czas}$), aby ocenić, jak szybko zmiany temperatury postępują. Tempo zmian jest następnie używane do oszacowania pozostałego czasu zapasu zdadności dla danego podzespołu. Jeśli na podstawie ustalonego tempa

prognozowany zapas użytkowy wynosi więcej niż rok, status pozostaje „OK”, co oznacza, że podzespół jest nadal zdolny do pracy.

W przypadku, gdy zapas czasu eksploatacyjnego jest krótszy niż rok, system generuje ostrzeżenie i ustawia tzw. „flagę”. Flaga ta wskazuje, że podzespół wymaga szczególnej obserwacji, a algorytm dodaje go do listy modułów monitorowanych pod kątem dalszych zmian temperatury. Dodatkowo, system zapisuje podzespół do planu działań serwisowych, co umożliwia zaplanowanie odpowiednich czynności konserwacyjnych z wyprzedzeniem w momencie gdy większa liczba podzespołów tego typu będzie wymagała działań utrzymaniowych. Algorytm dodatkowo monitoruje dynamikę zmian temperatury, a jej nagłe skoki lub spadki będą wskazywały na nieprawidłowości.

Zastosowanie tego algorytmu pozwala na bieżące monitorowanie warunków termicznych i dynamiki ich zmian, co pozwala skuteczniej i bezpieczniej utrzymywać prawidłowy stan techniczny pojazdu zwiększając jego niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji.



Rys. 7.10 Algorytm **D_Q** oceny wartości prądu podzespołu metodą komparacji.

źródło: Opracowanie własne.

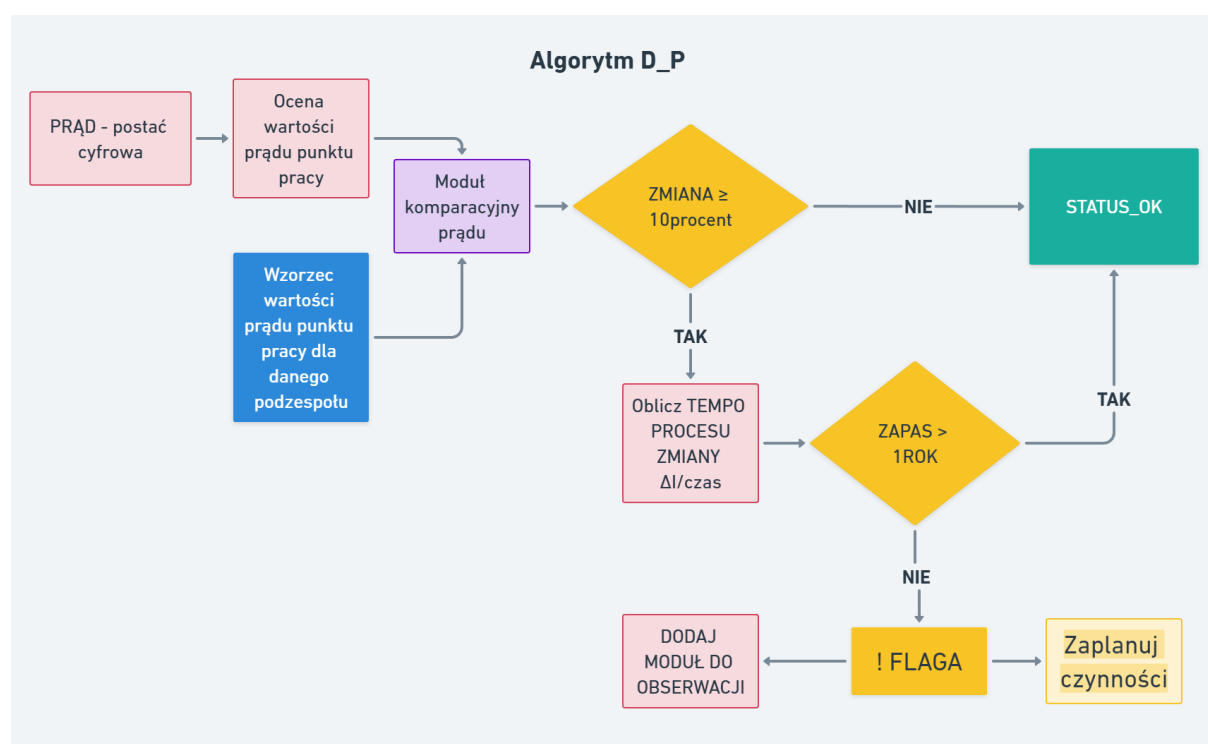
Algorytm tego modułu umożliwia ocenę stanu technicznego podzespołu na podstawie wartości prądu dla tego modułu rejestrowanego on-line. Proces analizy polega na porównaniu aktualnych wartości prądów z ustalonymi technicznie wartościami granicznymi i normatywnymi.

Jeżeli zmierzona wartość prądu mieści się w założonych granicach, system klasyfikuje stan podzespołu jako prawidłowy. Gdy wartość prądu przekracza dopuszczalny zakres (np. wykrocza poza 1,4 wartości prawidłowej) system generuje sygnał alarmowy.

W sytuacji alarmowej algorytm uruchamia procedurę diagnostyczną, w ramach której pojazd jest wycofywany, a podzespół zostaje poddany badaniu. Alarm może być wywołany różnymi czynnikami, w tym przeciążeniem elektrycznym, zwarcie, nadmiernym zużyciem elementów wewnętrznych podzespołu lub błędnym działaniem układów sterowania.

Zastosowanie algorytmu komparacji pozwala na bieżące monitorowanie i ocenę stanu technicznego podzespołów na podstawie parametrów elektrycznych dzięki czemu możliwe jest szybkie wykrycie nieprawidłowości i zwiększa poziom bezpieczeństwa eksploatacji.

Algorytm D_P, przedstawiony na rysunku 7.11 służy do oceny stanu technicznego podzespołu poprzez analizę zmian wartości prądu w punkcie pracy. Algorytm umożliwia wychwytywanie istotnych odchyłeń od normalnych wartości, które mogą sygnalizować potencjalne problemy techniczne. Dzięki analizie tempa zmian prądu punktu pracy możliwe jest przewidywanie zapasu zdatności działania podzespołu i zapewnienie działań zapobiegawczych z odpowiednim wyprzedzeniem.



Rys. 7.11 Algorytm oceny tempa zmian prądu punktu pracy **D_P** metodą komparacji.

źródło: Opracowanie własne.

Proces rozpoczyna się od rejestracji wartości prądu podzespołu w postaci cyfrowej. Następnie bieżące wartości prądu są przekazywane do modułu oceny, który analizuje prąd w punkcie pracy podzespołu i porównuje go z ustalonym wzorcem, charakterystycznym dla

prawidłowego stanu tego podzespołu. Wzorzec ten stanowi odniesienie dla typowych wartości prądu w warunkach normalnej eksploatacji.

Jeśli zmierzona wartość prądu mieści się w zakresie dopuszczalnych odchyłek (tj. zmiana nie przekracza 10% względem wzorca), algorytm klasyfikuje stan podzespołu jako „STATUS_OK”, oznaczając brak konieczności interwencji. W przypadku, gdy wartość prądu przekracza ten próg (zmiana > 10%), system przechodzi do obliczenia tempa procesu zmian, analizując przyrost wartości prądu w punkcie pracy w funkcji czasu ($\Delta I/\text{czas}$).

W kolejnym kroku algorytm ocenia pozostały zapas czasu eksploatacyjnego podzespołu, uwzględniając obliczone tempo zmian prądu. Jeżeli przewidywany czas dalszej zdatności do pracy wynosi ponad rok, podzespół pozostaje w trybie „STATUS_OK” w przeciwnym razie generowany jest sygnał „flaga”.

W przypadku aktywacji flagi system dodaje podzespół do listy obserwacyjnej oraz do planu działań serwisowych, co pozwala na monitorowanie dalszych zmian prądu w czasie. Algorytm monitoruje również dynamikę zmian wartości prądu takich jak nagłe skoki lub nietypowe obniżenia sygnału, które mogą wskazywać na potencjalne problemy w działaniu podzespołu.

Dzięki zastosowaniu tej metody analizy tempa zmian wartości prądu, algorytm skutecznie wspiera prewencyjne utrzymanie techniczne pojazdu i jego podzespołów, co istotnie wpływa na podniesienie poziomu bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu.

Podsumowując, opisany proces algorytmiczny prowadzenia analizy on-line danych otrzymywanych z pojazdu oraz otrzymywania raportu potwierdzającego prawidłowy stan pojazdu i jego podzespołów oraz określonego zapasu zdatności eksploatacyjnej pozwala na optymalizację procesu utrzymania pojazdów kolejowych metra. Na podstawie raportów generowanych z systemu obrazowane są także wszystkie nieprawidłowości stanów podzespołów poszczególnych pojazdów. Pozwala to na podejmowanie natychmiastowych decyzji mitygujących ryzyko wystąpienie niepożądanych skutków uszkodzeń tych podzespołów oraz ewentualnych skutków będących negatywnymi następstwami dla następnych elementów pojazdu.

7.3. Planowanie utrzymania wspomagane systemem predykcyjnym - przebieg procesu decyzyjnego

Współczesne systemy utrzymania taboru kolejowego coraz częściej integrują zaawansowane technologie monitorowania stanu technicznego podzespołów oraz analizę dużych zbiorów danych. Dzięki proponowanemu w niniejszej rozprawie systemowi możliwe

jest ciągle i precyzyjne śledzenie parametrów eksploatacyjnych wszystkich kluczowych komponentów pojazdu w czasie rzeczywistym.

Takie podejście umożliwia nie tylko bieżącą ocenę kondycji poszczególnych elementów, ale także predykcję ich przyszłego zużycia, co z kolei pozwala na wykorzystanie tej wiedzy do zmiany systemu panowo-zapobiegawczego na system predykcyjny wykorzystujący dostępne metody. System przedstawiony w rozdziale 6.1 pozwala na zmianę cykli przeglądowych opisanych w Dokumentacji systemu utrzymania na system predykcyjny.

Analiza zmiany standardowego sposobu utrzymania pojazdów - planowo zapobiegawczego dla np. łożyska maźnicy zestawu kołowego przy zastosowaniu zaawansowanego systemu nadzoru on-line pokazuje możliwości tego systemu.

Pierwotny system przeglądów

W pierwotnym systemie utrzymania, czynności utrzymaniowe dla maźnicy zestawu kołowego są wykonywane co 4 lata, zgodnie z harmonogramem przeglądów poziomu P4.1. Taki harmonogram opiera się na konserwatywnych założeniach projektantów i producentów, którzy, ze względów bezpieczeństwa, określają interwały przeglądów z dużym marginesem. Czynności wykonywane podczas przeglądu P4 obejmują:

- Demontaż i inspekcję łożysk: Ocena stanu zużycia, obecności mikropęknięć czy korozji.
- Kontrolę systemu smarowania: Sprawdzenie jakości smaru, usunięcie zanieczyszczeń, uzupełnienie lub wymiana smaru.
- Weryfikację uszczelnień: Zapobieganie wnikaniu wody i zanieczyszczeń, które mogą przyspieszać zużycie.
- Badania nieniszczące: Zastosowanie technik takich jak ultradźwięki czy prądy wirowe do wykrywania ukrytych defektów.
- Wymianę zużytych komponentów: Zapobieganie awariom poprzez prewencyjną wymianę elementów.

Takie podejście, choć zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa, nie uwzględnia rzeczywistego stanu technicznego poszczególnych maźnic, co może prowadzić do przedwczesnej wymiany komponentów i niepotrzebnych kosztów.

Wprowadzenie zaawansowanego systemu nadzoru on-line

Proponowany w niniejszej rozprawie system nadzoru pojazdu wykorzystuje nowoczesne technologie, które umożliwiają ciągle monitorowanie stanu technicznego maźnic w czasie rzeczywistym.

Dzięki wprowadzeniu systemu nadzoru on-line, przewidywane jest przejście od utrzymania planowo zapobiegawczego do utrzymania predykcyjnego, opartego na stanie technicznym.

W praktyce oznacza to:

- Wydłużenie interwałów przeglądów: Na podstawie rzeczywistych danych o stanie maźnicy, interwały mogą być bezpiecznie wydłużone np. z 4 do 8 lat.
- Dynamiczne planowanie przeglądów: Przeglądy są planowane na podstawie prognozowanego zużycia, a nie sztywnych harmonogramów.
- Szybka reakcja na nieprawidłowości: System ostrzega o odchyleniach od normy, co pozwala na interwencję zanim dojdzie do awarii.
- Redukcja nieplanowanych przestojów: Dzięki predykcji awarii, można uniknąć niespodziewanych zatrzymań pojazdów.

Wprowadzenie zaawansowanego systemu nadzoru on-line dla sprawności pojazdów kolejowych stanowi istotny krok w kierunku nowoczesnego zarządzania utrzymaniem pojazdów kolejowych. Pozwala to na przejście od sztywnych harmonogramów przeglądów do elastycznego, opartego na danych podejścia, które zwiększa bezpieczeństwo, optymalizuje koszty i podnosi efektywność operacyjną. Mimo wyzwań związanych z inwestycjami, adaptacją personelu i zapewnieniem zgodności regulacyjnej, korzyści płynące z takiego systemu są znaczące.

7.4. Wstępna ocena systemu predykcyjnego zalety i ograniczenia w modelu

Zakres korzyści płynących z zastosowania systemu predykcyjnego jest znaczący. Wdrożenie go do normalnej eksploatacji wymaga jednak znacznych nakładów i sprawnej organizacji. Aby ocenić zasadność zastosowania systemu należy wyliczyć jego wady i wyzwania.

Korzyści wynikające z implementacji systemu nadzoru:

- Zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji: Ciągły monitoring pozwala na wykrycie potencjalnych problemów zanim staną się krytyczne.
- Optymalizacja kosztów: Redukcja liczby przeglądów i lepsze wykorzystanie żywotności komponentów prowadzi do oszczędności finansowych.
- Zwiększenie dostępności taboru: Mniej przestojów przekłada się na większą efektywność operacyjną.
- Poprawa jakości danych: Gromadzenie dużej ilości danych pozwala na ciągłe doskonalenie modeli predykcyjnych.

Wyzwania i wymagania:

- Inwestycje początkowe: Wdrożenie systemu wymaga nakładów na sprzęt, oprogramowanie i infrastrukturę IT.
- Bezpieczeństwo danych: Konieczne jest zapewnienie odpowiedniego poziomu cyberbezpieczeństwa.
- Adaptacja personelu: Pracownicy powinni być przeszkoleni w obsłudze nowych systemów i interpretacji danych.
- Integracja z istniejącymi procesami: System musi współpracować z obecnymi systemami zarządzania utrzymaniem.
- Regulacje prawne: Wydłużenie interwałów przeglądów musi być zaakceptowane Urząd Transportu Kolejowego

Potencjalne ryzyka i ograniczenia

- Falszywe alarmy: Nieprawidłowa interpretacja danych może prowadzić do niepotrzebnych interwencji.
- Ograniczenia techniczne: Warunki eksploatacji (np. temperatury, wibracje) mogą wpływać na działanie czujników.
- Akceptacja przez personel: Opór przed zmianą może utrudniać wdrożenie nowych

Biorąc pod uwagę wszystkie opisane czynniki zastosowanie systemu predykcyjnego wydaje się uzasadnione.

8. Weryfikacja i ocena modelu – Case study

8.1. Ustalenie obiektu i danych technicznych pojazdu

Pojazd, dla którego możliwe jest wdrożenie systemu predykcyjnego powinien być wyposażony w opisane w tej pracy rozwiązania techniczne. Weryfikacji modelu dla potrzeb potwierdzenia tezy rozprawy dokonano na podstawie pojazdu typu Inspiro produkcji firmy Siemens. Dane techniczne pojazdu zostały przedstawione w dalszej części niniejszego punktu (Tabela 8.1). Zdaniem autora rozprawy, dla pojazdu typu Inspiro produkcji Siemens, możliwe jest stosunkowo niedużym nakładem środków uzyskanie systemu predykcyjnego, ponieważ posiadają już one w znacznym stopniu systemy sensoryczne i transmisyjne niezbędne do zbudowania postulowanego systemu.

Pojazdy typu Inspiro weszły do eksploatacji w Metrze Warszawskim w październiku 2013 roku (Rys. 8.1) [27]. Pojazd ten to jedna z najnowocześniejszych konstrukcji tego typu na świecie.



Rys.8.1. Pojazd typu Inspiro produkcji niemieckiej firmy Siemens. Źródło: [27]

Tabela 8.1. Dane techniczne pojazdu typu Inspiro produkcji firmy Siemens

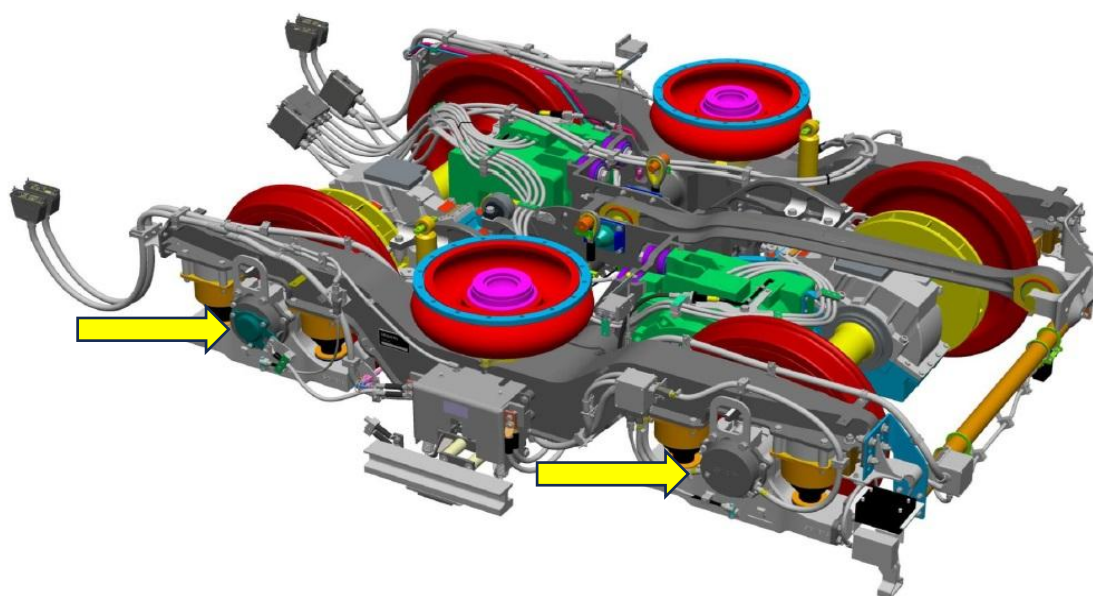
l.p	Parametry techniczne i ruchowe	wartość
1	Liczba i rodzaj wagonów	4 wagony napędowe (Czołowe i pośrednie) 2 wagony doczepne (pośrednie)
2	Układ wagonów	Mc-T1-M=M-T1-Mc
3	Długość pojazdu	117766 mm
4	Szerokość drzwi pasażerskich	1400 mm
5	Ilość miejsc siedzących w pociągu	232
6	Ilość miejsc stojących w pociągu	1268
7	Napęd	16x 140 kW – silniki asynchroniczne
8	Rodzaj rozruchu	Falownik
9	Konstrukcja pudła wagonu	Aluminiowa
10	Masa wagonu czołowego	29,2 Mg
11	Masa wagonu pośredniego	27,1 Mg
12	Masa wagonu pośredniego tocznego	22,8 Mg
13	Masa pociągu	158,2 Mg
14	Zawieszenie II stopnia	Pneumatyczne (poduszka powietrzna)
15	Zawieszenie I stopnia	Sprężyny metalowo-gumowe
16	Sprężarka	śrubowa, bezolejowa
17	Łożysko maźnicy	Zamknięte
18	Oświetlenie przedziału pasażerskiego	Panele LED
19	Monitoring przestrzeni pasażerskiej	Tak – 4 kamery na wagon
20	Rekuperacja	Tak
21	Jednoprzestrzennosc	Tak

Źródło: [27]

Metro Warszawskie posiada 37 tego typu pojazdów zestawionych w 6-wagonowe składy.

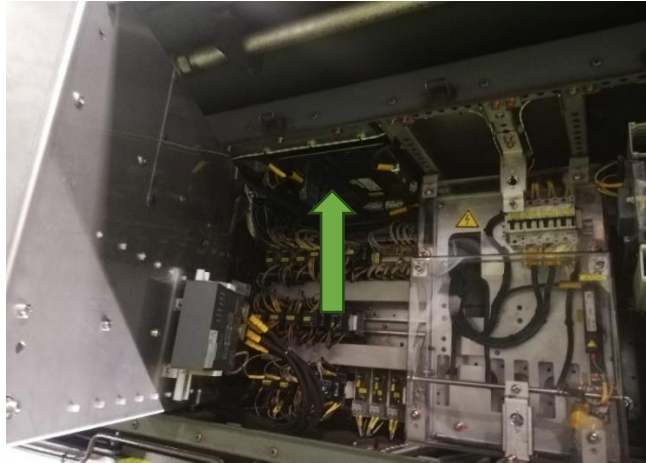
8.2. Identyfikacja na danych rzeczywistych obiektu – prezentacja danych

Dla sprawdzenia zachowania systemu dokonano pomiaru i rejestracji danych rzeczywistych na generowanych w trakcie normalnej pracy pojazdów metra. Zarejestrowane dane, które posłużą do zweryfikowania modelu to drgania (przebieg przyspieszeń) generowane przez akcelerometry zamontowane na zestawach kołowych pojazdu oraz temperatura maźnicy (rys.8.2). Elementem, który poddany zostanie sprawdzeniu będzie łożysko maźnicy, którego stan stanowi bezpośrednio o sprawności podzespołu maźnicy. W zakresie pomiaru temperatury będą to dane z czujnika temperatury zamontowanego na maźnicy.



Rys.8.2. Wózek jezdny pojazdu typu Inspiro firmy Siemens. Źródło: [16]

Rys.8.2 przedstawia wózek jezdny pojazdu typu Inspiro na którym zaznaczono maźnice zestawów kołowych oznaczone żółtymi strzałkami. Widoczne są także zamontowane akcelerometry do mierzenia przyspieszeń bezpośrednio na tym elemencie pojazdu. Czujnik temperatury zamontowany jest na korpusie obudowy. Dane rejestrowane zarówno przez akcelerometr jak też przez czujnik temperatury są przesyłane i agregowane w jednostce nadzoru sprawności pojazdu (rys.8.3).

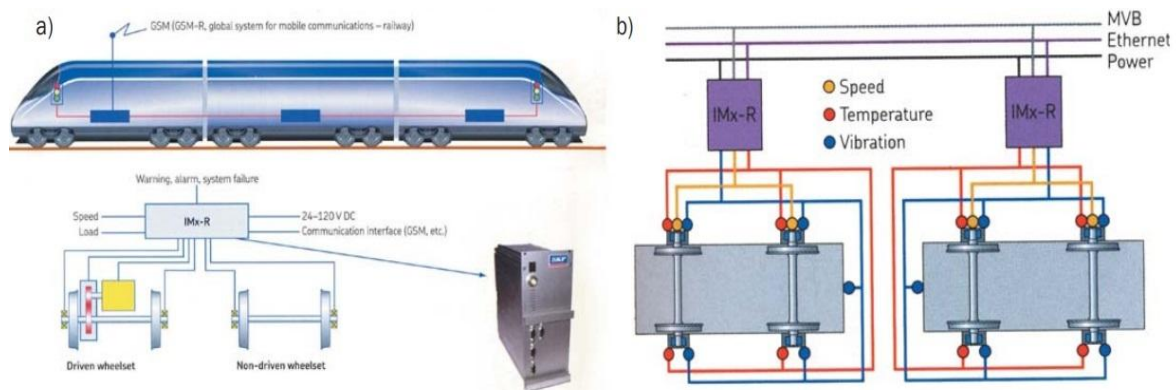


Rys.8.3. Moduł BDU agregujący rejestrowane dane przyspieszeń oraz temperatury.

Źródło: [14]

Zamontowany moduł BDU rejestruje w trybie ciągłym wartości przyspieszeń w 4 akcelerometrów jednego wózka oraz z 4 czujników temperatury. Dane te są następnie wykorzystywane do zgrubnej diagnostyki wózka służącej do oceny przebiegu pracy tego elementu w trakcie przeglądu lub naprawy rewizyjnej wyższego poziomu.

Rys.8.4 przedstawia system firmy SKF wykorzystany jako element całego systemu diagnostyki pojazdu. Zadaniem systemu jest rejestrowanie i automatyczne wykrywanie anomalii pojawiających się w trakcie eksploatacji systemu.



System monitorowania: a) układu napędowego SKF Multilog

Rys.8.4. Schemat systemu IMx-R firmy SKF zastosowanego na pojeździe. Źródło: [74]

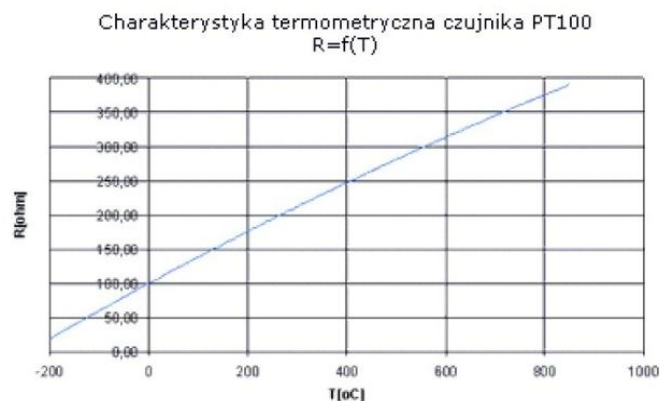
Rys. 8.5 zawiera dane techniczne czujnika temperatury zastosowanego w systemie pomiarowym maźnicy zastosowany w pojeździe. Rys. 8.6 zawiera charakterystykę pracy tego czujnika. Dane przez niego zbierane są rejestrowane w jednostce elektronicznej BDU prezentowanej na Rys. 8.3



Dane techniczne	Czujnik temperatury GEL 2161
Obszar zastosowania	Pojazdy szynowe, technologia automatyzacji
Element pomiarowy	Pt100,
pomiar prądu	0,3 do 1,0 mA
Głowica pomiarowa temperatury	-40°C ... +250°C
Aktywna głowica pomiaru długości	10 mm
Pomiar długości rury	co najmniej 130 mm
Technologia połączeń	Obwód 2, 3, przewodowy
Materiał rurki pomiarowej	Stal nierdzewna
Klasa ochrony	IP68

Rys.8.5. Czujnik temperatury i jego dane techniczne. Źródło: [14]

Na rys. 8.6. przedstawiono charakterystykę czujnika temperatury zamontowanego w maźnicy pojazdu.



Rezystor Pt100 PN-EN 60751+A2									
T (°C)	R (W)	T (°C)	R (W)	T (°C)	R (W)	T (°C)	R (W)	T (°C)	R (W)
-100	60,26	10	103,90	120	146,07	230	186,84	340	226,21
-90	64,30	20	107,79	130	149,83	240	190,47	350	229,72
-80	68,33	30	111,67	140	153,58	250	194,10	360	233,21
-70	72,33	40	115,54	150	157,33	260	197,71	370	236,70
-60	76,33	50	119,40	160	161,05	270	201,31	380	240,18
-50	80,31	60	123,24	170	164,77	280	204,90	390	243,64
-40	84,27	70	127,08	180	168,48	290	208,48	400	247,09
-30	88,22	80	130,90	190	172,17	300	212,05	450	264,18
-20	92,16	90	134,71	200	175,86	310	215,61	500	280,98
-10	96,09	100	138,51	210	179,53	320	219,15	550	297,49
0	100,00	110	142,29	220	183,19	330	222,68	600	313,71

Rys.8.6. Charakterystyka czujnika temperatury zamontowanego w maźnicy pojazdu.

źródło: [14]

Rys. 8.7 pokazuje zdjęcie czujnika przyspieszeń zamontowanego pod maźnicami. Wymaga on precyzyjnego montażu, ponieważ drgania rejestrowane przez niego dotyczą kierunku „Z” czyli pionowego. Czujnik ten nie rejestruje drgań podłużnych ani poprzecznych.



Rys. 8.7 Czujnik przyspieszeń zastosowany umieszczony pod maźnicą wózka.
źródło: [14]

Dane techniczne akcelerometru zawarte są na Rys. 8.8.

Model Number 602M64	INDUSTRIAL 3-WIRE ACCELEROMETER		Revision: B ECN #: 51059
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS
Sensitivity(± 20 %)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s ²)	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range(12 VDC)	± 50 g	± 490 m/s ²	M – Metric Mount
Measurement Range(5 VDC)	± 15 g	± 147 m/s ²	Supplied Accessory: Model M081B97 Captive Mounting Bolt, M6 x 1 x 25 mm long, hex head (1)
Frequency Range(± 3 dB)	90 to 480,000 gpm	1.5 to 8,000 Hz	
Resonant Frequency	1,500 kcpm	25 kHz	
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	2 mg	19.6 min/s ²	
Non-Linearity	± 1 %	± 1 %	
Transverse Sensitivity	± 7 %	± 7 %	
Environmental			
Overload Limit(Shock)	5,000 g pk	49,050 m/s ² pk	
Temperature Range	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	
Temperature Response	See Graph	See Graph	
Enclosure Rating	IP68	IP68	
Electrical			
Settling Time(within 1% of bias)	≤ 5.0 sec	≤ 5.0 sec	
Discharge Time Constant	≥ 0.1 sec	≥ 0.1 sec	
Excitation Voltage	5 to 12 VDC	5 to 12 VDC	
Output Impedance	< 100 Ohm	< 100 Ohm	
Current Draw	0.5 mA	0.5 mA	(2)
Output Bias Voltage	2.5 to 6 VDC	2.5 to 6 VDC	
Spectral Noise(10 Hz)	18 µg/√Hz	176.6 (µm/sec ²)/√Hz	(2)
Spectral Noise(100 Hz)	4 µg/√Hz	39.2 (µm/sec ²)/√Hz	(2)
Spectral Noise(1 kHz)	2 µg/√Hz	19.6 (µm/sec ²)/√Hz	(2)
Electrical Isolation(Case)	> 10 ⁸ Ohm	> 10 ⁸ Ohm	
Physical			
Size (Length x Width x Height)	1.65 in x 0.74 in x 0.845 in	41.9 mm x 18.8 mm x 21.5 mm	
Weight	2.61 oz	74.0 gm	
Mounting Thread	1/4-28 Male	No Metric Equivalent	(5)
Mounting Torque	2 to 5 R-lb	2.7 to 6.8 Nm	
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel	
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic	
Electrical Connector	3-Pin MIL-C-5015	3-Pin MIL-C-5015	
Electrical Connection Position	Side	Side	
<p>NOTES:</p> <p>(1) Conversion Factor 1g = 9.81 m/s².</p> <p>(2) Typical.</p> <p>(3) The high frequency tolerance is accurate within ±10% of the specified frequency.</p> <p>(4) Zero-based, least-squares, straight line method.</p> <p>(5) 1/4-28 has no equivalent in S.I. units.</p> <p>(6) See PCB Declaration of Conformance PS205 for details.</p>			
<p>SUPPLIED ACCESSORIES:</p> <p>Model 081B97 Captive Mounting Bolt 3165S - 7/16 HEX 1/4-28 UNF (1)</p>			
Entered: LK	Engineer: GD	Sales: MC	Approved: BAM
Date: 09/15/2020	Date: 09/15/2020	Date: 09/15/2020	Date: 09/15/2020
			Spec Number: B6466
			Phone: 800-959-4464 Fax: 716-654-3823 E-Mail: imi@pcb.com
3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043			
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Piezotronics, Inc.			

Rys. 8.8. Karta charakterystyki czujnika przyspieszeń stosowanego w pojeździe. źródło: [14]

W dalszej części omówione zostaną dane zarejestrowane z badanego pojazdu. Osprzęt, zestaw sensoryczny i moduły elektroniczne opisane w tej części pracy służą do rejestracji danych pomiarowych zbieranych przez pojazd w trakcie jego eksploatacji. Obecnie zastosowany system diagnostyczny jedynie w sytuacji krytycznej sygnalizuje prowadzącemu pojazd, że nastąpił błąd krytyczny, co eliminuje pojazd z dalszej eksploatacji. System nie przesyła danych do stacji techniczno-postojowej i nie dokonuje predykcji stanu elementów pojazdu. Ocena dotyczy jedynie stanu bieżącego i jest agregowana w pamięci modułów diagnostycznych.

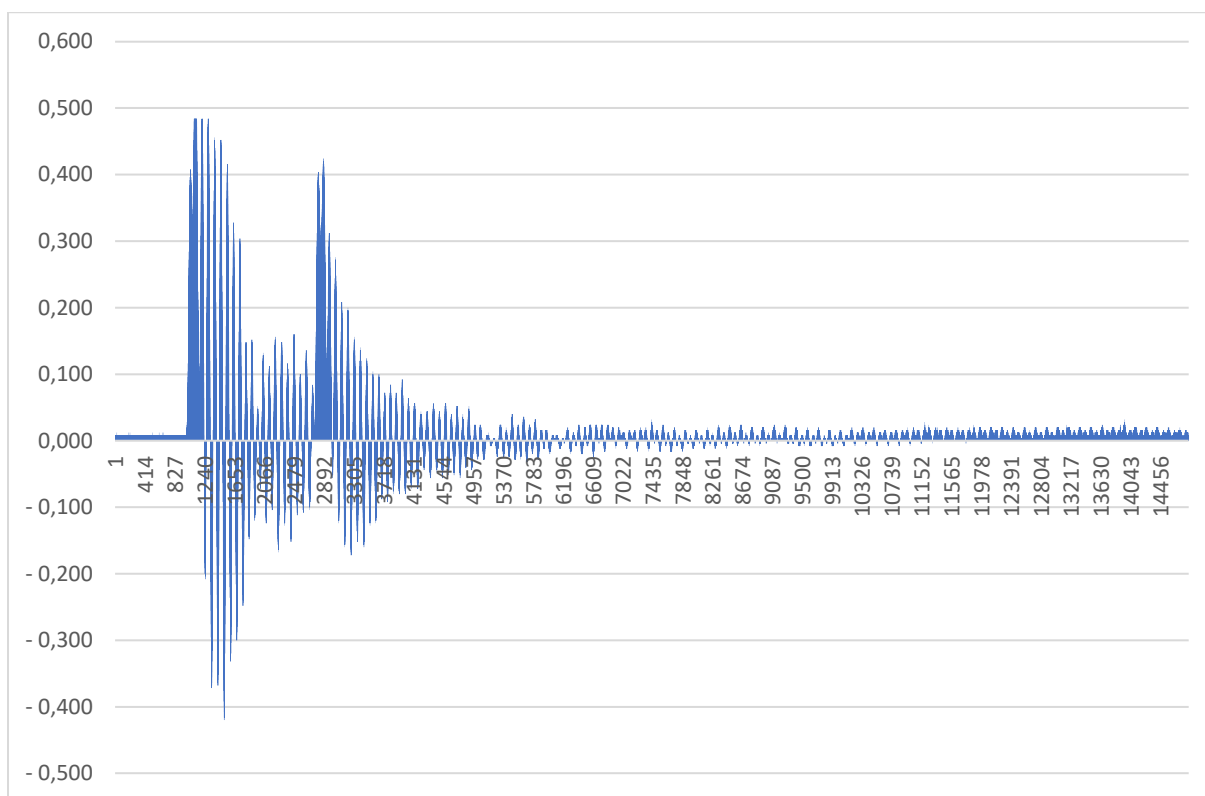
Dopiero zjazd pojazdu do stacji techniczno-postojowej powoduje, że można zweryfikować zaistniałe w trakcie eksploatacji błędy. Dopiero na zapleczu technicznym możliwe jest dokonanie oceny zdarzeń przeszłych. Producent nie zastosował narzędzi predykcyjnych, które umożliwiałyby analizę procesów technicznych w podzespołach pojazdu. Jakakolwiek analiza wymaga wydobycia zapisanych danych surowych i odpowiedniego ich zinterpretowania. Bez zastosowania systemu automatyzującego ten proces jest to zadanie nieefektywne i stosunkowo trudne do zrealizowania.

Surowe dane rejestrowane w pojeździe mają ogromną objętość w postaci stabelaryzowanych wartości liczbowych i wymagają odpowiedniej obróbki kalibracji i interpretacji, tak aby wyłowić z nich procesy fizyczne. Dane przedstawione w niniejszej dysertacji są jedynie wrywkowymi elementami ogromnych zbiorów danych, które zostały odpowiednio skalibrowane, opracowane i przedstawione w postaci wykresów obrazujących przebieg procesów fizycznych przebiegających w pojeździe.

Dane z akcelerometru

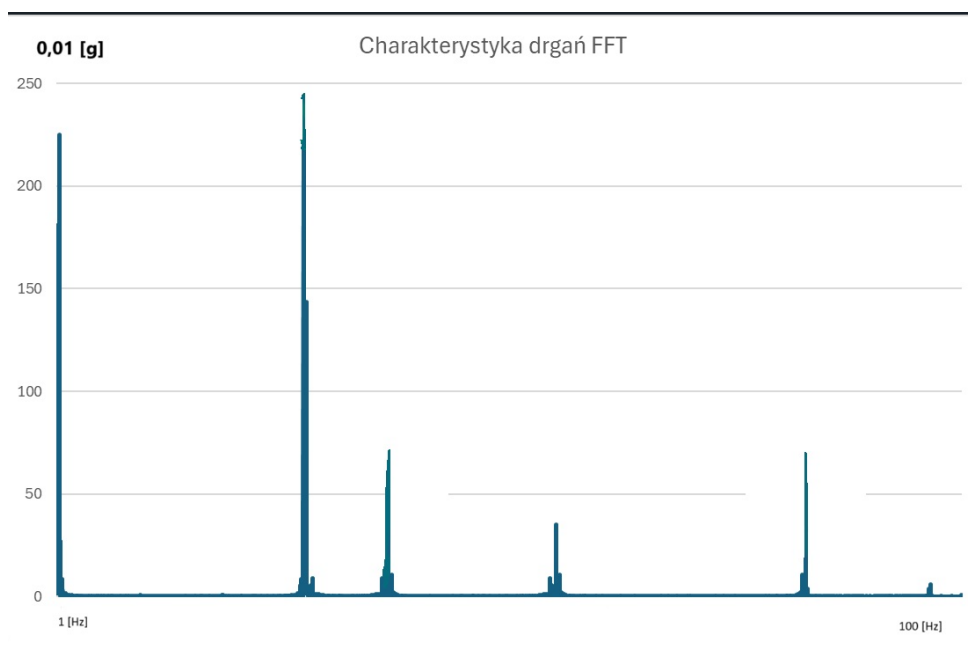
Drgania przedstawione na Rys.8.9 zostały zarejestrowane w pojeździe nr 52 typu Inspiro w trakcie 15 sekundowego przejazdu z intensywnym rozruchem i momentem wybiegu pojazdu, bez ponawiania rozruchu.

Wykres drgań w funkcji czasu przedstawia surowy przebieg przyspieszeń zarejestrowany w trakcie jazdy testowej pojazdu. Dane zostały zarejestrowane przy pomocy zestawionego i odpowiednio skalibrowanego układu pomiarowego. Wykres w funkcji czasu nie przedstawia bezpośrednio użytecznej wartości i wymaga przetransformowania w dziedzinę częstotliwości (fft) lub analizy przy użyciu sieci neuronowej. Na osi „OX” odłożony jest czas w milisekundach. Wykresy tego typu mogą być używane do treningu systemów sieci neuronowych Machine Learning, tak aby nauczyły się one identyfikować anomalie pojawiających się w trakcie eksploatacji pojazdu. Tego typu elementy analityczne zostały wykorzystane w systemie predykcyjnym opisanym w niniejszej dysertacji.



Rys.8.9. Wykres przyspieszeń zarejestrowanych w trakcie rozruchu pojazdu. *źródło: [14]*

Znacznie bardziej użytecznym w bezpośredniej obserwacji jest transformata FFT wykresu przedstawionego na Rys. 8.9

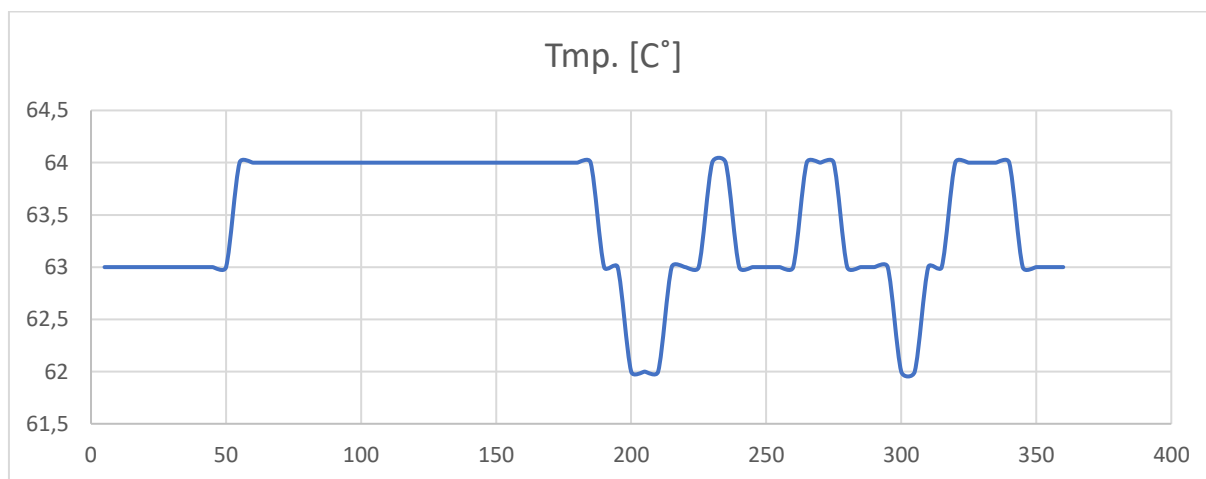


Rys. 8.10 Wykres przyspieszeń w dziedzinie częstotliwości; *źródło: opracowanie własne*

Transformata FFT zarejestrowanego przebiegu charakteryzuje istotne cechy drgań takie jak określona amplituda przy określonej częstotliwości. Częstotliwości charakterystyczne są dla dynamiki układu mechanicznego określonych elementów pojazdu. Zmiany zarówno amplitudy jak też przesunięcia w dziedzinie częstotliwości rejestrowanego sygnału w zależności od tempa i wartości tych zmian będą wskazywały na długofalowe procesy dynamiczne występujące w danym podzespolu pojazdu.

Dane z czujnika temperatury

Wykres z Rys. 8.11 zawiera przebieg wartości temperatury rejestrowany przez czujnik zainstalowany na korpusie maźnicy. Temperatura maźnicy w trakcie normalnej eksploatacji wynosi ok. 60° - 90° [C] i waha się przy stałym obciążeniu w granicach ± 5 stopni. Drugim czynnikiem wpływającym na wartość tego parametru jest prędkość pojazdu. Wykres wygenerowany został w programie Excel na bazie surowych danych cyfrowych zarejestrowanych w module elektronicznym BDU nadzorującym parametry wózka. W zakresie tych temperatur praca maźnicy przebiega w sposób prawidłowy. Temperatura może się wahać przy większym obciążeniu. W tym przypadku temperatura była zarejestrowana przy pojeździe bez pasażerów i prędkości ok. 50 [km/h].



Rys. 8.11. Wykres temperatury zarejestrowanej w trakcie pracy pojazdu;
źródło: opracowanie własne

8.3. Analiza przypadków dla danych rzeczywistych

W podrozdziałach 8.3.1 oraz 8.3.2 zostanie przeprowadzona analiza „case Study” dwóch przypadków bazujących na danych pomiarowych z systemu. Surowe dane cyfrowe zostały

zaczepnięte z podzespołu BDU pojazdu typu Inspiro i po opracowaniu przedstawione w rozdziale 8.2.

8.3.1. Analiza systemu zdefiniowanego w rozdziale 6 – sygnał drgań

W tej części rozprawy zostanie przeprowadzona analiza systemu predykcyjnego dla danych rzeczywistych drgań zarejestrowanych na maźnicy pojazdu Inspiro.

Dane zostały przedstawione na Rys. 8.9 – przebieg czasowy drgań z akcelerometru, oraz na Rys. 8.10 – przebieg w dziedzinie częstotliwości po operacji transformaty FFT sygnału przedstawionego na Rys. 8.9

Zgodnie z algorytmami A_Q, A_P, dla sygnału w dziedzinie czasu oraz B_Q, B_P, dla sygnału w dziedzinie częstotliwości przedstawionymi na Rys. 7.4 i 7.5, system przeprowadza ocenę według następującej zasady:

Prawidłowo → wzorzec → serwis [odchylenie standardowe] → max [dwa sigma]

Prawidłowo → wzorzec → [transformata FFT] → max [jedna trzecia + 1/4 amplitudy]

Zatem, system predykcyjny według algorytmu A_Q bazując na wzorcach wytrenowanych w Machine Learning system porównuje prawidłowość przebiegu i ocenia czy ewentualne anomalie mieszczą się w granicach między jednym a dwoma odchyleniami standardowymi. Następnie jeśli wartość odchylenia jest większa niż 2 sigma system ocenia tempo zmian odchylenia.

Taka sama procedura jest przeprowadzana w dziedzinie częstotliwości dla wykresu czasowego po transformacji FFT.

Po analizie danych zarejestrowanych można stwierdzić, że wartości zarówno przebiegu czasowego jak też w dziedzinie częstotliwości mieszczą się w zakresie standardowym, który się nie zmienia. Oznacza to, że system wystawi notę „STATUS OK”, a predykcja będzie wskazywała na bezpieczną eksploatację przez więcej niż rok.

Działanie systemu potwierdziło jego prawidłowość i dobry stan pojazdu.

8.3.2. Analiza systemu zdefiniowanego w rozdziale 6 – sygnał temperatury

W tej części zostanie przeprowadzona analiza systemu predykcyjnego dla danych rzeczywistych temperatury zarejestrowanych na maźnicy pojazdu Inspiro. Dane zostały przedstawione na Rys. 8.11 – przebieg temperatury maźnicy w trakcie normalnej eksploatacji pustego pojazdu z prędkością 50 [km/h].

Zgodnie z algorytmami C_Q, C_P, dla sygnału temperatury w dziedzinie czasu przedstawionymi na Rys. 7.8 i 7.9, system przeprowadza ocenę według następującej zasady:

- temperatura łożyska maźnicy $< 150^{\circ}$
- temperatura punktu pracy w zakresie $60^{\circ} - 90^{\circ}[C]$

Zatem system predykcyjny według algorytmu C_Q bazując na wzorcu wartości $(150^{\circ} [C]_{max})$ porównuje wartość temperatury i ocenia czy warunek jest zachowany. Taka sama procedura jest przeprowadzona dla algorytmu C_P przeprowadzana w ocenie czy następuje zmiana temperatury punktu pracy maźnicy.

Po analizie danych zarejestrowanych można stwierdzić, że wartości temperatury maksymalnej jak też temperatury punktu pracy mieszczą się w zakresie standardowym, który się nie zmienia. Oznacza to, że system wystawi notę „STATUS OK”, a predykcja będzie wskazywała na bezpieczną eksploatację przez więcej niż rok.

Działanie systemu potwierdziło jego prawidłowość i dobry stan pojazdu.

8.4. Analiza i ocena uzyskanych rezultatów

Weryfikacja opracowanego algorytmu oceny i predykcji stanu podzespołu maźnicy została przeprowadzona na podstawie zestawu danych rzeczywistych zarejestrowanych podczas pracy urządzenia w normalnych warunkach eksploatacyjnych. Proces ten obejmował kilka kluczowych etapów: akwizycję danych pomiarowych, ich przetwarzanie wstępne, zastosowanie algorytmu do oceny aktualnego stanu urządzenia oraz przeprowadzenie prognozy jego przyszłego stanu w określonych horyzontach czasowych. Weryfikacja wyników była realizowana poprzez porównanie wyników algorytmu z rzeczywistymi obserwacjami, co pozwoliło na ocenę dokładności, stabilności i skuteczności opracowanego rozwiązania.

Wyniki analizy wykazały wysoką zgodność oceny stanu urządzenia z rzeczywistością, co potwierdza poprawność zastosowanego podejścia i modelu obliczeniowego. Prognozowanie przyszłych stanów urządzenia również przyniosło satysfakcjonujące rezultaty – uzyskane predykcje odzwierciedlały zmiany w zachowaniu urządzenia w sposób spójny z rzeczywistymi wynikami pomiarów.

Podsumowując, przeprowadzone badanie jednoznacznie wskazuje, że opracowany algorytm cechuje się wysoką skutecznością w zakresie oceny bieżącego stanu urządzenia oraz przewidywania jego stanu w przyszłości. Dzięki wysokiej stabilności działania algorytm stanowi przydatne i skuteczne narzędzie w zastosowaniach związanych z eksploatacją i utrzymaniem pojazdów kolejowych metra. Możliwość jego implementacji w systemach

przemysłowych przyczyni się do zwiększenia niezawodności, efektywności oraz bezpieczeństwa pracy pojazdów szynowych metra, a w przyszłości prawdopodobnie także innych pojazdów kolejowych. Ponadto uzyskane wyniki wskazują na potencjał dalszego rozwoju algorytmu, szczególnie w kierunku optymalizacji jego działania w specyficznych warunkach eksploatacyjnych w tunelu metra.

9. Wymogi implementacji systemu w metrze warszawskim

9.1. Uwarunkowania i wymagania procesu implementacji systemu w metrze

Proces implementacji systemu predykcyjnego w metrze wymaga uwzględnienia wielu różnorodnych czynników. Są to m.in. czynniki prawne, techniczne, organizacyjne oraz finansowe.

W szczególności istotne jest, aby realizacja takiego projektu wdrożenia była zgodna z przepisami prawa regulującymi eksploatację i utrzymanie pojazdów kolejowych metra zgodnie z systemem prawnym opisanym w niniejszej dysertacji. Dla jego wdrożenia konieczne będzie uzyskanie odstępstwa od Rozporządzenia z 12 października 2005 r. Nie mniej istotnym elementem jest wpływ na bezpieczeństwo pasażerów. Wymagania te wynikają z regulacji krajowych oraz Unii Europejskiej.

Kolejnym ważnym aspektem jest analiza technicznych możliwości implementacji systemu na obecnych pojazdach. Większość współczesnych pojazdów kolejowych w metrze posiada już podstawowe systemy monitorowania stanu technicznego (np. systemy diagnostyki pokładowej, takie jak rejestratory zdarzeń lub czujniki podstawowych parametrów). Niemniej jednak, aby umożliwić pełną integrację algorytmu oceny i predykcji, konieczna byłaby modernizacja obecnych systemów poprzez dodanie nowych czujników, rozbudowę systemów transmisji danych oraz budowę infrastruktury serwerowej do przechowywania i analizy danych na Stacji Techniczno-Postojowej.

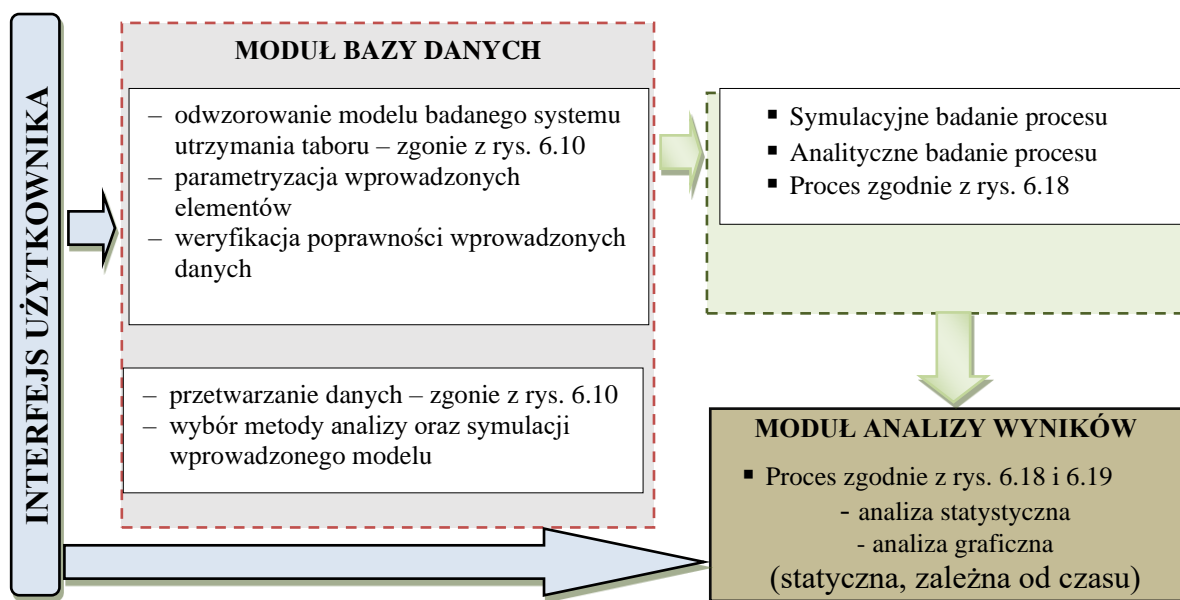
Ważnym wymaganiem jest zapewnienie, aby dodatkowe elementy nie zakłócały działania istniejących systemów bezpieczeństwa oraz były zgodne z wymaganiami homologacyjnymi.

Istotnym ograniczeniem w procesie implementacji są także kwestie organizacyjne. System wymaga nie tylko instalacji odpowiednich komponentów technicznych, ale również przeszkolenia personelu odpowiedzialnego za obsługę systemu i podejmowanie decyzji na podstawie jego wyników. Operatorzy techniczni, analitycy oraz kadra zarządzająca pojazdami musi być świadoma, jak interpretować dane generowane przez algorytm, oraz jakie działania są konieczne w przypadku wykrycia potencjalnych zagrożeń.

Nie można również pominąć analizy ekonomicznej wdrożenia. Implementacja tego systemu wiąże się z wysokimi kosztami początkowymi, w tym modernizacją floty taborowej, budową infrastruktury IT oraz zakupem koniecznego oprogramowania. Aby wdrożenie było ekonomicznie uzasadnione, konieczne jest oszacowanie potencjalnych oszczędności wynikających z optymalizacji harmonogramów utrzymania i redukcji liczby awarii w czasie rzeczywistym. Istotne jest również przeprowadzenie analizy zwrotu z inwestycji, która

powinna uwzględniać takie czynniki jak wydłużenie okresów międzyobsługowych, zmniejszenie kosztów pracy oraz poprawa dostępności pojazdów.

Techniki komputerowe, w tym symulacyjne umożliwiają na zaprojektowanie, a następnie parametryzację opracowanych predykcyjnych modeli symulacyjnych w taki sposób, aby badać oceniać stan poszczególnych elementów/podzespołów taboru kolejowego (metra warszawskiego). Można wyróżnić szereg gotowych aplikacji komputerowych dedykowanych do prowadzenia analiz predykcyjnych. Pomimo, że dostępne aplikacje oferują różne metody wprowadzania danych, odwzorowywania systemów oraz różne metody ich analizy czy rozwiązania to nie są dedykowane dla obsługi systemów utrzymania taboru kolejowego. Uogólniony schemat funkcjonowania takich programów przedstawiono na Rys. 9.1.



Rys. 9.1. Uogólniony schemat koncepcji do badań systemu utrzymania taboru kolejowego.

Źródło: opracowanie własne

Najistotniejszym elementem modelu predykcyjnego jest moduł obliczeniowy realizujący proces oceny poszczególnych podzespołów. Na rynku znajduje się część rozwiązań programowych czy też silników pozwalających zbudować taki moduł analityczny, ale w każdym przypadku musi to być system przygotowany indywidualnie dla konkretnego zestawu wymagań i warunków eksploatacyjnych w zależności od konkretnych warunków u danego operatora. Nie ma gotowych modułów dopasowanych bezpośrednio do potrzeb takiego systemu w metrze warszawskim. Można go zbudować na podstawie konkretnych wymagań, m.in. przedstawionych w niniejszej pracy.

9.2. Możliwy plan wdrożenia

Zakłada się, że wdrożenie systemu powinno zostać podzielone na etapy, aby ograniczyć ryzyko związane z wprowadzeniem nowej technologii. Zapewni to płynne przejście od istniejących procedur utrzymaniowych do bardziej zaawansowanego systemu opartego na modelu predykcyjnym.

Kolejne etapy wdrożenia systemu utrzymania taboru można zapisać następująco:

Etap 1: Analiza wymagań i przygotowanie projektu

Na tym etapie należy przeprowadzić szczegółową analizę potrzeb organizacji oraz dostępnych technologii. Kluczowym elementem będzie analiza techniczna obecnej infrastruktury oraz opracowanie szczegółowego projektu technicznego i harmonogramu wdrożenia. Konieczne jest również przeprowadzenie analizy zgodności z regulacjami prawnymi oraz pozyskanie środków na taki projekt.

Etap 2: Budowa infrastruktury technicznej

Następny krok to instalacja brakujących komponentów technicznych na wybranej grupie pojazdów. Będzie to obejmować montaż dodatkowych czujników, modernizację istniejących systemów transmisji danych oraz budowę serwerów baz danych i infrastruktury analitycznej. Konieczna będzie integracja z istniejącymi systemami.

Etap 3: Testy pilotażowe

Na tym etapie system zostanie wdrożony na ograniczonej liczbie pojazdów, aby ocenić skuteczności i niezawodności systemu w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Testy pilotażowe powinny obejmować ocenę dokładności prognoz oraz ich przydatności w podejmowaniu decyzji dotyczących utrzymania.

Etap 4: Stopniowe rozszerzanie wdrożenia

Po pomyślnym zakończeniu testów pilotażowych system może być stopniowo wprowadzany na pozostałe pojazdy. Ważnym elementem tego etapu, na który należy zwrócić szczególną uwagę, będzie szkolenie personelu obsługującego system oraz opracowanie szczegółowych procedur operacyjnych postępowania.

Etap 5: Monitoring i optymalizacja

Po pełnym wdrożeniu systemu konieczne jest regularne monitorowanie działania systemu oraz wprowadzanie niezbędnych korekt w celu poprawy skuteczności oraz wyeliminowania nieprawidłowości działania. Wdrożenie systemu powinno być traktowane jako proces ciągły, wymagający bieżącej adaptacji.

9.3. Ocena wpływu na eksploatację

Wdrożenie systemu predykcyjnego dla pojazdów kolejowych metra znacząco i pozytywnie wpłynie na sposób zarządzania eksploatacją pojazdów. Przyniesie to w ocenie autora rozprawy znaczące korzyści, ale także wymagać będzie odpowiednich zmian organizacyjnych.

Najważniejszą korzyścią z wdrożenia systemu jest zwiększenie efektywności utrzymania pojazdów, zwiększenie ich dostępności, automatyzacja części procesu utrzymania i zmniejszenie nakładu pracy. Dzięki wykorzystaniu zaawansowanej analizy danych i algorytmów predykcyjnych można będzie przewidzieć wystąpienie potencjalnych usterek.

W efekcie pozwala to wdrożyć stosowne działania mitygujące przed wystąpieniem niebezpiecznych skutków. Ograniczy to dla części podzespołów konieczność stosowania sztywnych harmonogramów o określonym odstępie czasowym, które często prowadzą do niepotrzebnych i nadmiarowych czynności obsługowych. W efekcie operator może zmniejszyć liczbę przeglądów technicznych oraz skupić się na działaniach rzeczywiście koniecznych, co przekłada się na zwiększenie efektywności utrzymania pojazdów.

10. Podsumowanie i wnioski

10.1. Wnioski ogólne

W pracy przeprowadzono rozważania w ujęciu teoretycznym jak i użytkowym z zakresu utrzymania i eksploatacji pojazdów kolejowych metra.

Uzyskane efekty można przedstawić w następujących punktach

I. W części teoretycznej rozprawy przeprowadzono analizę zagadnienia.

Przeprowadzone badania w rozprawie miały na celu (rozdz. 2) *opracowanie systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra przy wykorzystaniu dostępnych obecnie technologii elektronicznych i informatycznych dla transmisji danych on-line na potrzeby oceny technicznej istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji części elementów pojazdów użytkowanych przez metro*. Oznacza to, że głównym problemem badawczym było wykorzystanie systemu parametrycznego dla stworzenia systemu predykcyjnego, który dzięki transmisji danych on-line i ich automatycznej analizie zoptymalizuje system utrzymania taboru, co znacząco zwiększy dostępność użytkowanego taboru i zwiększy poziom bezpieczeństwa eksploatacji pojazdów metra.

Przeprowadzone badania i analizy udokumentowane w niniejszej rozprawie potwierdziły zarówno potencjał naukowy jak też użytkowy do stworzenia systemu predykcyjnego do wykorzystania w utrzymaniu i eksploatacji pojazdów metra. Cel naukowy jak i cele dodatkowe rozprawy zostały osiągnięte, a teza udowodniona.

W ramach rozprawy dokonano:

- zdefiniowania i uporządkowania najważniejszych pojęć związanych z utrzymaniem predykcyjnym pojazdów kolejowych metra, takich jak diagnostyka predykcyjna pojazdu, ocena stanu technicznego oraz zapas zdatności eksploatacyjnej.
- przedstawiono najważniejsze aspekty zwiększenia bezpieczeństwa i zdolności optymalizacyjnych procesu utrzymaniowego pojazdów wspomaganego podejściem predykcyjnym,
- analizy złożoności procesów utrzymania i eksploatacji pojazdów kolejowych, uwzględniając czynniki technologiczne, organizacyjne i prawne, które determinują możliwości wdrożenia nowoczesnych systemów monitorowania stanu technicznego,
- analizy możliwości wykorzystania elementów symulacji w systemie predykcyjnym utrzymania pojazdów kolejowych

- usystematyzowania stanu wiedzy w zakresie algorytmów predykcyjnych oraz systemów monitorowania w transporcie kolejowym, wskazując aktualne trendy technologiczne
- przedstawienia wyzwań związanych z implementacją takich rozwiązań w transporcie kolejowym ze szczególnym uwzględnieniem pojazdów metra,
- identyfikacji i zdefiniowania wymagań dla systemu predykcyjnego w kontekście eksploatacji pojazdów metra, w tym wymagań technicznych, prawnych oraz organizacyjnych niezbędnych do jego skutecznego wdrożenia.

II. W części praktycznej rozprawy:

- opracowano model decyzyjny dla systemu predykcyjnego, uwzględniający różnorodne scenariusze eksploatacyjne oraz strukturę decyzyjną w zakresie planowania czynności utrzymaniowych ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji procesów utrzymania i oceny zapasu zdolności podzespołów pojazdu kluczowych dla bezpieczeństwa eksploatacji,
- opracowano algorytm metody systemu predykcji stanu pojazdów kolejowych, bazujący na analizie danych rzeczywistych on-line oraz zaawansowanych metodach obliczeniowych, takich jak modele Machine Learning i analiza trendów,
- zweryfikowano opracowaną metodę na podstawie danych rzeczywistych, co potwierdziło skuteczność algorytmu zarówno w ocenie aktualnego stanu technicznego pojazdów, jak i w prognozowaniu ich stanu w określonych horyzontach czasowych.

III. Opracowana została koncepcja systemu oceny i predykcji stanu pojazdów kolejowych metra, która obejmuje zarówno aspekty techniczne, jak i organizacyjne. System uwzględnia potrzeby operatora metra w zakresie optymalizacji kosztów utrzymania oraz poprawy niezawodności i bezpieczeństwa pojazdów.

IV. Opracowane zostały wytyczne dla wdrożenia systemu w metrze warszawskim, w tym:

- ogólny harmonogram etapowego wdrożenia, umożliwiający minimalizację ryzyka operacyjnego,
- specyfikacja wymogów systemu, aby mógł spełniać on przewidziane funkcje, takich jak czujniki, systemy transmisji danych, infrastruktura IT oraz oprogramowanie analityczne,
- ramy prawne i organizacyjne wdrożenia, w tym wymogi regulacyjne oraz procedury operacyjne.

- V. Przeprowadzona weryfikacja metody potwierdziła jej skuteczność oraz możliwość zastosowania w warunkach rzeczywistych. Wdrożenie systemu zgodnie z jego założeniami pozwala na zwiększenie efektywności utrzymania pojazdów i jej optymalizację, ograniczenie liczby nieplanowanych usterek pojazdów oraz optymalizację kosztów operacyjnych zarządzającego flotą.

10.2. Kierunki dalszych badań

Zrealizowane prace w ramach niniejszej dysertacji wskazują na potencjał rozwoju w następujących obszarach:

- rozszerzenie algorytmu o dodatkowe zmienne diagnostyczne, co może zwiększyć dokładność predykcji oraz umożliwić bardziej precyzyjną identyfikację problemów technicznych,
- optymalizacja zastosowanych algorytmów oceny stanu i predykcji dla rejestrowanych sygnałów,
- rozszerzenie analizy bezpieczeństwa danych systemu i skuteczności ich przesyłu
- rozszerzenie modułu raportującego dla zwiększenia przejrzystości i łatwości oceny dokonywanej przez obsługę,
- zbadanie możliwości adaptacji systemu do innych typów pojazdów transportu miejskiego i krajowego, takich jak pojazdy kolejowe naziemne, tramwaje czy autobusy elektryczne,
- zbadanie możliwości adaptacji systemu do innych typów urządzeń podlegających długotrwałej wieloletniej eksploatacji, także systemów infrastrukturalnych,
- analiza długoterminowego wpływu systemu na żywotność pojazdów oraz ich koszty cyklu życia (LCC), co pozwoli na lepsze zrozumienie korzyści ekonomicznych wdrożenia,
- przedstawione w rozprawie rozwiązania stanowią podstawę dla dalszego rozwoju technologii predykcyjnych w utrzymaniu i eksploatacji pojazdów metra oraz mogą przyczynić się do poprawy efektywności i niezawodności transportu kolejowego.

Bibliografia

- [1] Andreas I. Nicolaou, Mohammed Ibrahim, Eric van Heck, „Information quality, trust, and risk perceptions in electronic data exchanges”, Science Direct 2013
- [2] Antkowiak T., Pawlak Z.: „Diagnostyka techniczna układu biegowego trakcyjnego pojazdu szynowego” Technika Transportu Szynowego 10/2014
- [3] Atamuradov V., Medjaher K., Dersin P., Lamoureux B., Zerhouni N.: “Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners - Review, Implementation and Tools Evaluation”, International Journal of Prognostics and Health Management, listopad 2020
- [4] Biecek P., Kozak A., Zawada A.: Wprowadzenie do modelowania predykcyjnego, Uniwersytet Warszawski, 2022
- [5] Bobrowski D.: Modele i metody matematyczne teorii niezawodności, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985
- [6] Bukowski L.: System of systems dependability –Theoretical models and applications examples, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 151, 2016, s. 76–92.
- [7] Burdzik R., Nowak B. Koncepcja systemu predykcji drganiowej zbliżającego się pojazdu szynowego, W: Diagnostyka Maszyn. XLVIII Ogólnopolskie Sympozjum, Wisła, 27.02-2.03. 2022. Streszczenia / Peruń Grzegorz, Konieczny Łukasz (red.), 2022, Politechnika Śląska, s.20-20, ISBN 978-83-964252-0-1
- [8] Burdzik R., Nowe wyzwania i możliwości w diagnostyce technicznej - „nowa fizyka”, sztuczna inteligencja i komputery kwantowe. W: Jubileuszowe 50. Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Wisła, 03-07.03.2024 r / Peruń Grzegorz, Konieczny Łukasz (red.), 2024, Politechnika Śląska, s.20-22, ISBN 978-83-964252-2-5
- [9] Bustos A., Rubio H., Soriano E., Castejon C.: Towards Digitalizing Rolling Stock Maintenance, 2023
- [10] Calabrese F., Regattieri A., Bortolini M., Gamberi M., Pilati F.: “Predictive Maintenance: A Novel Framework for a Data-Driven, Semi-Supervised, and Partially Online Prognostic Health Management Application in Industries” MDPI, kwiecień 2021
- [11] Daniewski K., Kosicka E., Mazurkiewicz D. Analysis of the correctness of determination of the effectiveness of maintenance service actions. Management and Production Engineering Review. 2018, vol. 9, nr 2, s. 20-25
- [12] Dersin P., Alessi A., Lamoureux B., Brahimi M., Fink O.: “Prognostics and Health Management in Railways”, Handbook of RAMS in Railway Systems, czerwiec 2017.
- [13] Dimitrova E., Tomov S.: Digital Twins: An Advanced technology for Railways Maintenance Transformation, IEEE 2021
- [14] Dokumentacja Metra Warszawskiego Sp. z o.o. (zgoda w załączeniu dysertacji)
- [15] Dokumentacja Systemu Utrzymania pojazdów typu Inspiro produkcji Siemens
- [16] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa pojazdów typu Inspiro produkcji Siemens
- [17] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa pojazdów typu Varsovia produkcji Skoda
- [18] Dyrektywa 2004/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r.
- [19] Dyrektywa 2008/110/WE zmieniająca dyrektywę 2004/49/WE w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych.
- [20] Feinstein A. H., Cannon H. M.: Hermeneutical approach to external validation; [w:] Simulation & Gaming 34/2, 2003.

- [21] Fumeo E., Oneto L., Anguita D.: Condition Based Maintenance in Railway Transportation Systems Based on Big Data Streaming Analysis, 2015
- [22] Ghaboura S., Ferdousi R., Laamarti F., Yang C., Saddik A.: Digital Twin for Railway: A Comprehensive Survey; IEEE 2023
- [23] Gouriveau R., Medjaher K., Zerhouni N.: “From Prognostics and Health Systems Management to Predictive Maintenance 1: Monitoring and Prognostics, Oline Library, październik 2016.
- [24] Gutenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2003.
- [25] <https://dbkfleetmanagement.com/telematyka-wszystko-co-musisz-wiedziec/>
- [26] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=celex%3A32008L0110;> Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/110/WE z dnia 16 grudnia 2008 r. zmieniająca dyrektywę 2004/49/WE w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych
- [27] <https://metro.waw.pl/metro-warszawskie/informacje-o-taborze/>
- [28] <https://skybrary.aero/articles/aircraft-condition-monitoring-system-acms>
- [29] <https://stadlerrail.com/pl/signalling/rozwiazania-cyfrowe/>
- [30] <https://utk.gov.pl/pl/bezpieczenstwo-systemy/dokumentacje-systemu-ut/11846,Dokumentacje-systemu-utrzymania-pojazdow-kolejowych.html>
- [31] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adx1345.pdf>
- [32] <https://www.flir.eu/products/c3-x/?vertical=condition%20monitoring&segment=solutions>
- [33] <https://www.iso.org/standard/38102.html>
- [34] <https://www.iso.org/standard/38102.html>
- [35] <https://www.kistler.com/US/en/cp/mems-capacitive-k-beam-accelerometers-8316a/P0000497>
- [36] <https://www.lem.com/en/current-sensors>
- [37] <https://www.ni.com/en/shop/compactrio.html>
- [38] <https://www.sw.siemens.com/pl-PL/technology/digital-twin/>
- [39] <https://www.vishay.com/en/thermistors/ntc/>
- [40] Ignasiak E. red.: Badania operacyjne. PWE. Warszawa 1997
- [41] Izdebski M., Gołda P., Zawisza T.: The Use of the Ant Algorithm in the Model of Safety Management of the Traffic Organization at the Apron. Journal of KONBiN 52: 63–76, 2022, <https://doi.org/10.2478/jok-2022-001>
- [42] Izdebski M.: Badanie i zarządzanie ryzykiem w transporcie drogowym z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2023 Warszawa.
- [43] Izdebski M.: The use of heuristic algorithms to optimize the transport issues on the example of municipal services companies. Archives of Transport 2015;29(1): 27–36. <https://doi.org/10.5604/08669546.1146961>.
- [44] Jacyna M, Semenov I.: Models of vehicle service system supply under information uncertainty. Eksploatacja I Niezawodn Maint Reliab 2020;22(4):694–704. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.13>.
- [45] Jacyna M. (red.): Kształtowanie systemów w wybranych obszarach transportu i logistyki. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2014

- [46] Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [47] Karkula M.: Modelowanie i symulacja procesów logistycznych. Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Kraków 2013.
- [48] Kim NI., Yarali M., Moradnia M., Aqib M.: „Piezoelectric Sensors Operating at Very High Temperatures and in Extreme Environments Made of Flexible Ultrawide-Bandgap Single-Crystalline AlN Thin Films” *Advanced Functional Materials*, 2023
- [49] Kochan A.: Teoretyczne podstawy cyfrowego bliźniaka aplikacji ETCS, Warszawa 2023, PW.
- [50] Kondratowicz L.: Modelowanie symulacyjne systemów, WNT 1978
- [51] König D., Stoyan D., (1979): *Metody teorii obsługi masowej*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1979.
- [52] Kostrzewski M., Melnik R., Koziak S.: „Potencjał systemu wykorzystania monitorowania stanu i diagnozowania pojazdów szynowych i toru w zakresie badań dopuszczeniowych” *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 2015
- [53] Kowalska-Koczwarą A., Pachla F., Stecz P., Stypuła K., Tatarą T., Lejk J., Sokołowski M.: *Vibration-Based Damage Identification and Condition Monitoring of Metro Trains: Warsaw Metro Case Study*. *Hindawi - Shock and Vibration*, vol. 2018, article ID 8475684, <https://doi.org/10.1155/2018/8475684>
- [54] Kozłowski E., Mazurkiewicz D., Żabiński T., Prucnal S., Sęp J. *Machining sensor data management for operation-level predictive model*. *Expert Systems with Applications*.- 2020, vol. 159, s. 1-22
- [55] Kurtz A.D., Ned A.A., Epstein A.H.: „Ultra high temperature, miniature, SOI sensors for extreme environments”, *Kulite Semiconductor Products, Inc.* 2004
- [56] Lasota M., Sokołowski M., Wojdat C., Pierzak A.: *Risk of adverse events in the transportation of oversize cargoes*, *Eksploatacja i niezawodność*, 2024
- [57] Leszczyński J.: *Modelowanie systemów i procesów transportowych*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1994
- [58] Licow R., Tomaszewski F. *Application of vibration signals in railway track diagnostics using a mobile railway platform*. *Archives of Transport - 2024*, vol. 71, iss. 3, s. 128-145
- [59] Majkowski A., Rak R.: „Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w systemach pomiarowych”, *Politechnika Warszawska*, 2018
- [60] Mangla M. (ed.), Shindle K. S. (ed.), Mehta V. (ed.), Sharma N. (ed.), Mohanty S. N. (ed.) *Handbook of Research on Machine Learning: Foundations and Applications 1st Edition*. CRC Press Taylor & Francis, 2024.
- [61] Mazidi K., *Machine Learning Handbook: Using R and Python*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018, ISBN 1721979611.
- [62] Muller A., Sarah G., *Machine learning, Python i data science*. Wprowadzenie. Wydawnictwo Helion, 2021
- [63] Nowacki G.: *Telematyka transportu drogowego*, Warszawa 2008
- [64] Osman I. H., Laporte G.: *Metaheuristics: A bibliography*, *Annals of Operation Research*, vol. 63, 1996.
- [65] *Oxford English Dictionary*, <https://www.oed.com/>, dostęp 30.01.2024.

- [66] Perić M., Miltenović A., Rangelov D., Rajić M.: *Digital Twin in Railway Applications*, University of NIS, 2022
- [67] Pidd, M.: *Computer Simulation in Management Science*. John Wiley & Sons, Chichester, 1998.
- [68] Przybyszewski M.: *Elektryczne Zespoły Trakcyjne – budowa, działanie, zasady utrzymania i obsługi*. Warszawa 2017, WKiŁ.
- [69] Romaniszyn Z., Wolfram T.: *Nowoczesny tabor szynowy*. Kraków 1997, Wyd. Specjalne Instytutu Pojazdów Szynowych, Politechnika Krakowska.
- [70] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 r. w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (Dz.U. nr 212, poz. 1771)
- [71] Scott M. J., Verhagen W., Bieber M., Marzocca P.: “A Systematic Literature Review of Predictive Maintenance for Defence fixed-Wing Aircraft sustainment and Operations” MDPI, wrzesień 2022
- [72] Shimizu M., Perinpanayagam S., Namoano B., A. Starr, “Real-Time Prognostics and Health Management Without Run-to-Failure Data on Railway Assets”, IEEE, marzec 2023
- [73] Sikora W. red.: *Badania operacyjne*. PWE. Warszawa 2008
- [74] SKF: *Railway technical handbook, Axleboxes, wheelset bearings, sensors, condition monitoring, subsystem and services*, PUB 42/P7 1098 EN – September 2010
- [75] Słownik języka polskiego, <http://sjp.pwn.pl/>, dostęp 20.01.2024.
- [76] Sobczak M.: *Prognozowanie. Teoria, przykłady, zadania*. Wyd. PLACET. Warszawa 2008
- [77] Szaciłło L, Jacyna M, Szczepański E, Izdebski M.: Risk assessment for rail freight transport operations. *Eksploatacja I Niezawodn Maint Reliab* 2021;23(3):476–88. <https://doi.org/10.17531/ein.2021.3.8>.
- [78] Tianyi Wang, Jianbo Yu, David Siegel, and Jay Lee „A Similarity-Based Prognostics Approach for Remaining Useful Life Estimation of Engineered Systems”, 2008
- [79] Tomaszewski F., Licow R., *Analysis of the Ways to Identify Rail Running Surface Defects by Means Vibration Signals*. *Problemy Kolejnictwa* - 2020, z. 186, s. 51-56
- [80] Tripathi D.R., Nishad D.K.: *Digital Twin Technology: Concepts and Applications*, 2019
- [81] Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (sejm.gov.pl)
- [82] Vriagnat P., Kratz F., Avila M.: „Sustainable manufacturing, maintenance policies, prognostics and health management: A literature review”, *Science Direct*, październik 2021
- [83] Wang F., Huisman J., Stevels A., Baldé C.P.: „Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input–Output Analysis” *Science Direct* 2013
- [84] Wawryszczuk R., Kardas-Cinal E., Lejk J., Sokołowski M.: *Methods of Passenger Ride Comfort Evaluation—Tests for Metro Cars*. *Sensors* 2023, 23(12), 5741; <https://doi.org/10.3390/s23125741>
- [85] Ważyńska-Fiok K.: *Podstawy teorii eksploatacji i niezawodności systemów*. WPW, Warszawa 1993
- [86] Xiaofan Fei, Chen Bin, C. Jun, Hu Shunhua: “Framework of Prognostic Health Management for Airline Predictive Maintenance, IEEE, sierpień 2020

- [87] Żak J.: Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe - Transport z. 99, Warszawa 2013.
- [88] Żak J.: Modelowanie procesów transportowych metodą sieci faz. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2013

Spis rysunków

Rys. 1.1. Cykl przeglądowo naprawczy pojazdów typu Inspiro produkcji Siemens .	166
Rys. 1.2. Cechy systemu predykcyjnego wymagane dla jego skuteczności.....	18
Rys. 1.3. Gradacja i opis poziomów utrzymania - poziom P1	24
Rys. 1.4. Gradacja i opis poziomów utrzymania - poziom P2	24
Rys. 1.5. Gradacja i opis poziomów utrzymania - poziom P3	25
Rys. 1.6. Gradacja i opis poziomów utrzymania - poziom P4	25
Rys. 1.7. Gradacja i opis poziomów utrzymania - poziom P5	26
Rys. 2.1. Schemat rozprawy doktorskiej.....	31
Rys. 3.1. Użycie poszczeg. elementów w procesie pozyskiwania i analizy danych....	38
Rys. 3.2. Zależność pomiędzy funkcją zawodności i niezawodności.....	42
Rys. 4.1. Schemat realizacji eksperymentu w rozprawie doktorskiej	51
Rys. 4.2. Struktura i organizacja systemu symulacji.....	52
Rys. 4.3. Powiązania między kolejnymi etapami procedury badań symulacyjnych dla potrzeb utrzymania taboru kolejowego.....	58
Rys. 4.4. Przykładowa ogólna struktura sieci neuronowej.....	65
Rys. 4.5. Schemat postępowania przy stosowaniu sieci neuronowych.....	653
Rys. 5.1. Uproszczony schemat utrzymania taboru – cykl utrzymaniowy	655
Rys. 5.2. Proces eksploatacji i utrzymania pojazdów warszawskiego metra.....	666
Rys. 5.3. Przykładowa karta Dokumentacji Systemu Utrzymania.....	677
Rys. 5.4. Proces funkcjonowania systemu predykcyjnego bazującego na systemie parametrycznym	69
Rys. 5.5. Prognozowanie resztkowego czasu eksploatacji.....	700
Rys. 5.6. Analiza widmowa drgań zarejestrowanych dla zawieszenia I stopnia pojazd	71
1	
Rys. 5.7. Analiza widmowa drgań zarejestrowanych dla zawieszenia I stopnia pojazd	712
Rys. 6.1. Przykładowa krzywa utraty potencjału użytkowego.....	78
Rys. 6.2. Algorytm oceny stanu koła jezdnego zestawu kołowego.....	82
Rys. 6.3. Algorytm oceny stanu osi jezdnej zestawu kołowego.....	83
Rys. 6.4. Algorytm oceny stanu maźnicy koła jezdnego zestawu kołowego.....	84
Rys. 6.5. Algorytm oceny zawieszenia I stopnia.....	84

Rys. 6.6. Algorytm oceny ramy wózka jezdnego.....	85
Rys. 6.7. Algorytm oceny przekładni głównej.....	86
Rys. 6.8. Algorytm oceny stanu drzwi pasażerskich.....	86
Rys. 6.9. Algorytm oceny stanu przekształtnika głównego	87
Rys. 6.10. Architektura predykcyjnego systemu monitoringu pojazdów - rejestracji, przesyłu i analizy danych pomiarowych z pojazdu	88
Rys. 6.11. Czujniki zestawu kołowego rejestrujące drgania i temperaturę.....	91
Rys. 6.12. Schemat działania modułu MPDP.....	92
Rys. 6.13. Schemat działania lokalnej bazy danych.....	92
Rys. 6.14. Schemat oceny parametru wejściowego systemu.....	97
Rys. 6.15. Struktura pomiarowa pojedynczego modułu pojazdu	99
Rys. 6.16. Struktura pomiarowa dla całego pojazdu	99
Rys. 6.17. Schemat struktury raportu łącznego dla podzespołów.....	100
Rys. 6.18. Blokowy schemat procesu oceny stanu modułów.....	101
Rys. 6.19. Raport z oceny stanu i predykcji maźnicy zestawu kołowego	102
Rys. 7.1. Ogólny schemat procesu decyzyjnego w oparciu o model oceny i predykcji stanu.....	103
Rys. 7.2. Schemat przebieg procesu analitycznego.....	1055
Rys. 7.3. Główny model serwera analitycznego.....	105
Rys. 7.4. Algorytm analizy drgań A_Q metodą Machine Learning.....	106
Rys. 7.5. Algorytm analizy tempa zmian drgań A_P metodą Machine Learning.....	107
Rys. 7.6. Algorytm analizy drgań B_Q metodą transformaty FFT.....	108
Rys. 7.7. Algorytm analizy tempa zmian drgań B_P metodą transformaty FFT.....	109
Rys. 7.8. Algorytm C_Q oceny stanu temp. pracy podzespołu metodą komparacji....	110
Rys. 7.9. Algorytm oceny tempa zmian temperatury C_P metodą komparacji.....	111
Rys. 7.10. Algorytm D_Q oceny wartości prądu podzespołu metodą komparacji.....	112
Rys. 7.11. Algorytm D_P oceny stanu temperatur pracy metodą komparacji.....	113
Rys. 8.1. Pojazd typu Inspiro produkcji niemieckiej firmy Siemens.....	118
Rys. 8.2. Wózek jezdny pojazdu typu Inspiro firmy Siemens.....	120
Rys. 8.3. Moduł BDU agregujący rejestrowane dane przyspieszeń i temperatury.....	121
Rys. 8.4. Schemat systemu IMx-R firmy SKF zastosowanego w pojeździe.....	121
Rys. 8.5. Czujnik temperatury i jego dane techniczne.....	122
Rys. 8.6. Charakterystyka czujnik temperatury zamontowanego w maźnicy pojazdu	122
Rys. 8.7. Czujnik przyspieszeń zastosowany i umieszczony pod maźnicą.....	123

Rys. 8.8. Karta charakterystyki czujnika przyspieszeń.....	123
Rys. 8.9. Wykres przyspieszeń zarejestrowanych w trakcie rozruchu pojazdu.....	125
Rys. 8.10. Wykres przyspieszeń w dziedzinie częstotliwości.....	125
Rys. 8.11. Wykres temperatury zarejestrowanej w trakcie pracy pojazdu.....	126
Rys. 9.1. Uogólniony schemat aplikacji do badań symulacyjnych systemu utrzymania taboru kolejowego	132

Spis tabel

Tabela 6.1. Zestawieni parametrów oceny ryzyka podzespołów pojazdu	79
Tabela 6.2. Mapa oceny ryzyka podzespołów pojazdu.....	80
Tabela 6.3. Analiza ryzyka poszczególnych podzespołów pojazdu.....	81
Tabela 8.1. Dane techniczne pojazdów typu Inspiro produkcji firmy Siemens.....	119