



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Robotyki i Mechatroniki

ROZPRAWA DOKTORSKA

DIAGNOZOWANIE URZĄDZEŃ STEROWANIA
RUCHEM KOLEJOWYM NA PRZYKŁADZIE NAPĘDU
ZWROTNICOWEGO

mgr inż. Aleksander Pełka

Promotor pracy:
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl

Kraków 2009

Mojej Rodzinie

Pragnę złożyć serdeczne podziękowanie
mojemu Promotorowi – Panu Profesorowi
Tadeuszowi Uhłowi za duże zaangażowanie,
profesjonalizm, wsparcie i pomoc naukową podczas
pisanie niniejszej pracy.

Składam również serdeczne wyrazy
podziękowania dla wszystkich pracowników i
doktorantów Katedry Robotyki i Mechatroniki
AGH, którzy przyczynili się do powstania niniejszej
pracy w trakcie wielu wspólnych prac i dyskusji
naukowych.

Autor

Spis treści

SPIS TREŚCI.....	4
1. WSTĘP.....	6
1.1. URZĄDZENIA STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM	7
1.1.1 Bezpieczeństwo systemów sterowania ruchem.....	9
1.2. DIAGNOSTYKA TECHNICZNA URZĄDZEŃ STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM W POLSCE.....	11
1.3. SYSTEMY DIAGNOSTYKI KOLEJOWEJ NA ŚWIECIE	13
1.4. METODY I TECHNIKI STOSOWANE W DIAGNOSTYCE MASZYN I URZĄDZEŃ	15
1.4.1 Diagnostyka według modelu.....	19
1.4.2 Przegląd metod wykorzystywanych w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych.....	20
1.5. CEL I ZAKRES PRACY	22
2. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ NAPĘDÓW ZWROTNICOWYCH I ICH ANALIZA POD KĄTEM MOŻLIWOŚCI DIAGNOZOWANIA.	25
2.1. NAPĘDY ZWROTNICOWE – DEFINICJA, PRZEZNACZENIE, FUNKCJE	25
2.2. NAPĘDY ZWROTNICOWE – PODZIAŁ I RODZAJE.....	26
2.2.1 Przegląd napędów zwrotnicowych stosowanych w Polsce.	28
2.2.2 Inne napędy zwrotnicowe stosowane na świecie	45
2.3. ROZJAZDY KOLEJOWE	53
3. BADANIA AWARYJNOŚCI I SERWISU UKŁADÓW NAPĘD-ZWROTNICA	59
3.1.1 Metodyka Reliability Centered Maintenance	59
3.1.2 Model eksploatacyjny napędu zwrotnicowego.....	61
3.2. BADANIA EKSPLOATACYJNE, OCENA NIEZAWODNOŚCI I TRWAŁOŚCI NAPĘDÓW	65
3.2.1 Opracowanie metodyki rejestracji czynności serwisowych	66
3.3. ANALIZA ZAPISÓW SERWISOWYCH.....	71
3.3.1 Napęd zwrotnicowy EEA-4	71
3.3.2 Napęd zwrotnicowy EEA-5	74
3.3.3 Subiektywna ocena i opinie pracowników utrzymania	76
3.4. PODSUMOWANIE BADAŃ	78
4. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU NAPĘD – ZWROTNICA.....	80
4.1. MODEL WIELOBRYŁOWY	80
4.1.1 Określenie podstawowych parametrów modelu	82
4.2. WYNIKI SYMULACJI.....	82
4.2.1 Przetwarzanie zwrotnicy napędem zwrotnicowym	82
4.2.2 Symulacje działania układu z wybranymi możliwymi usterkami	85
4.3. WNIOSKI DOTYCZĄCE SYMULACJI.....	99

5.	EKSPERYMENTALNE BADANIE DYNAMIKI UKŁADU NAPĘD – ZWROTNICA.	100
5.1.	UKŁAD POMIAROWY SIŁY NASTAWCZEJ	100
5.2.	TESTY LABORATORYJNE MODUŁU POMIAROWEGO.....	103
6.	BADANIA TERENOWE PROTOTYPU MODUŁU MONITOROWANIA	113
6.1.	BADANIA NA STACJI KOLEJOWEJ KOBIOR	113
6.2.	ZAREJESTROWANE PRZEBIEGI	114
6.3.	PORÓWNANIE WYNIKÓW POMIARÓW	117
6.4.	PODSUMOWANIE BADAŃ TERENOWYCH	119
7.	KONCEPCJA SYSTEMU DIAGNOZOWANIA.....	120
7.1.	DIAGNOSTYKA NAPĘDU METODAMI AI	122
7.1.1	Metoda Warda.....	128
7.1.2	Algorytm k-średnich.....	133
7.1.3	Sieć neuronowa	136
7.2.	PODSUMOWANIE.....	143
8.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	144
9.	LITERATURA:.....	146
10.	SPIS ILUSTRACJI:	153

1. Wstęp

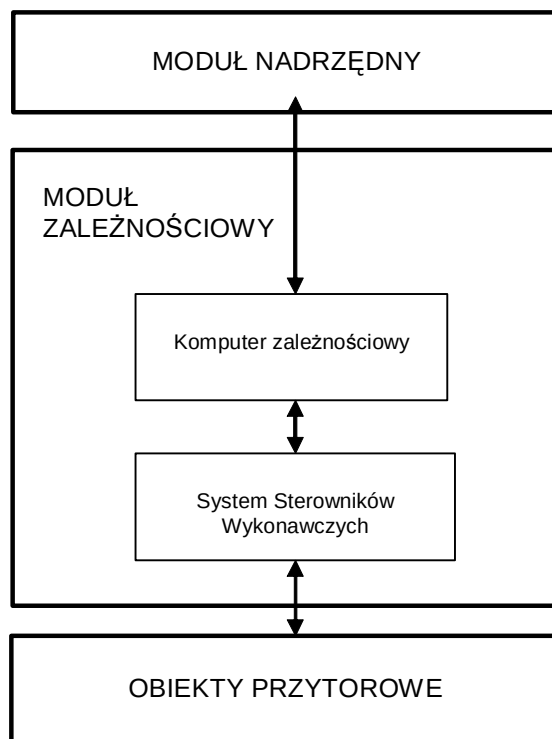
W obecnej chwili, wobec zmian rynkowych zachodzących w transporcie szynowym, wynikających głównie ze znaczącego zwiększania prędkości ruchu, oraz oczekiwań, co do wzrostu konkurencyjności transportu szynowego, kluczowego znaczenia nabiera zapewnienie bezpieczeństwa przewozów i dostępności infrastruktury dla operatorów świadczących usługi przewozowe [67], [47], [66], [10]. Utrzymanie infrastruktury kolejowej na akceptowalnym poziomie jest z racji rozległości sieci kolejowej oraz mnogości zainstalowanych systemów i urządzeń zadaniem angażującym znaczne siły i środki. Dlatego zapewnienie wysokiej niezawodności urządzeń infrastruktury kolejowej przy jednoczesnej maksymalnej racjonalizacji wydatków na ich utrzymanie powinno być głównym elementem polityki zapewnienia systemowego zarządzania gotowością i bezpieczeństwem przewozów. Kluczowym narzędziem umożliwiającym osiągnięcie wymaganego poziomu dostępności infrastruktury wydaje się scentralizowany system utrzymania i diagnostyki, który poprzez akwizycję danych eksploatacyjnych pochodzących z systemów i urządzeń oraz odpowiednie algorytmy decyzyjne i predykcyjne będzie umożliwiał redukcję kosztów utrzymania infrastruktury kolejowej poprzez optymalizację zarządzania przeglądami i naprawami.

System transportu kolejowego składa się z trzech podstawowych elementów: drogi kolejowej, pojazdów oraz systemów sterowania ruchem kolejowym. Praca ta będzie koncentrowała się wokół zagadnień związanych z problematyką diagnozowania urządzeń sterowania ruchem kolejowym. W Polsce urządzenia sterowania ruchem kolejowym jak i cała infrastruktura kolejowa charakteryzuje się wieloletnim okresem eksploatacji, co powoduje wzrost poziomu ryzyka wystąpienia awarii i prowadzi do zmniejszenia poziomu gotowości urządzeń [63]. Dodatkowo stale rosną oczekiwania, co do zwiększania jakości usług (punktualności) i prędkości przejazdów. Wymaga to ponoszenia znacznych nakładów finansowych na utrzymanie, naprawę i zapobieganie możliwym awariom urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Również obecny system diagnostyki urządzeń sterowania ruchem kolejowym, który jest oparty na

cyklicznych przeglądach stanu urządzeń bez względu na rzeczywiste potrzeby, wg ściśle opracowanych wytycznych i instrukcji jest powodem generowania dodatkowych kosztów serwisu i utrzymania urządzeń infrastruktury. Ograniczenie tych kosztów wydaje się możliwe poprzez optymalizację sposobu serwisowania urządzeń w kierunku prowadzenia bieżącej oceny i prognozy ich stanu technicznego [4],[1],[5],[9],[19],[20],[41],[60],[86]. Rozwój technik informatycznych, monitorowania oraz diagnostyki stwarza możliwości budowy systemów diagnostycznych opartych na analizie bieżącego i przyszłego stanu technicznego urządzeń z uwzględnieniem szeregu czynników eksploatacyjnych. Obecnie strategią umożliwiającą zrealizowanie takiego serwisu jest RCM (ang. Reliability Centered Maintenance), czyli prowadzenie serwisu poprzez zarządzanie niezawodnością obiektu [70],[49],[51],[55],[79],[68]. Zwłaszcza w przypadku napędów zwrotnicowych i urządzeń sygnalizacji, pozwoli to na zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa przewozów oraz do ograniczenia kosztów związanych z prowadzeniem utrzymania i kosztami usuwania awarii.

1.1. Urządzenia sterowania ruchem kolejowym

Sterowanie ruchem kolejowym jest procesem złożonym i odpowiedzialnym. Na stacji prowadzi się go centralnie poprzez specjalne systemy sterowania. Polega on na uprzednim ustawieniu z centralnego miejsca, bezpiecznej drogi przejazdu (tzw. przebiegu) pociągu przez stacje, zablokowaniu tej drogi na czas przejazdu pociągu i zwolnienie go po przejeździe. Obecnie do sterowania ruchem kolejowym na stacjach wykorzystywane są również elektroniczne systemy komputerowe, które sterują urządzeniami wykonawczymi, takimi jak zwrotnice, sygnalizatory, urządzenia detekcji pociągu itp. Budowa i działanie systemu sterowania na stacji zostanie przedstawiona na przykładzie komputerowego systemu sterowania [18]. Przykładową strukturę systemu przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Schemat blokowy komputerowego systemu sterowania ruchem kolejowym.

Elektroniczny komputerowy system sterowania składa się z następujących elementów:

- Moduł nadrzędny jest interfejsem pomiędzy operatorem a systemem zależnościowym.

Zadaniem tego modułu jest przyjmowanie poleceń od operatora, wstępna ich analiza i przekazywanie odpowiednich informacji do modułu zależnościowego oraz prezentacja stanu wszystkich obiektów fizycznych i sytuacji ruchowej na stacji.

- Moduł zależnościowy przetwarza informacje i wykonuje bezpieczne funkcje zależnościowe, we współpracy z modułem nadrzędnym.

Program sterujący modułu realizuje:

- § przetwarzanie prawidłowych sterowań z systemu nadrzędnego na rozkazy, które są bezpiecznie wysyłane do obiektów przytorowych,
- § blokowanie dostępu do obiektów, które biorą udział w przebiegu, dla użycia ich w innych przebiegach,

§ zwalnianie zamkniętych obiektów po zakończeniu przejazdu przez pociąg.

Moduł ten wraz z urządzeniami wykonawczymi odpowiada za bezpieczne prowadzenie ruchu na stacji. W przypadku błędu operatora urządzenia wykonawcze zawsze muszą przyjąć stan bezpieczny.

- Obiekty przytorowe są to urządzenia wykonawcze i zbierające informacje umiejscowione bezpośrednio przy torze. Na przykład do ustawienia i kontroli zwrotnic służą napędy zwrotnicowe, kontroli położenia pociągu – licznik osi lub obwody torowe, przekazywania informacji dla maszynisty – sygnalizatory.

W pracy szczególna uwaga zostanie zwrócona na diagnozowanie urządzeń przytorowych.

1.1.1 Bezpieczeństwo systemów sterowania ruchem.

Systemy sterowania ruchem kolejowym jak i urządzenia wykonawcze w tym napędy zwrotnicowe muszą spełniać specjalne wymagania dotyczące bezpieczeństwa ich funkcjonowania. Od niedawna stosuje się dedykowane Normy Europejskie określające wymagania dotyczące uznania i aprobaty elektronicznych systemów/podsystemów/urządzeń związanych z bezpieczeństwem sterowania ruchem kolejowym. Dotychczas istniały w tym zakresie jedynie różne zalecenia krajowe i ogólne wskazania Międzynarodowego Związku Kolei (UIC). Podstawowe normy związane z bezpieczeństwem to EN 50126 [52] dotycząca oprogramowania i EN 50129 [53] dotycząca bezpieczeństwa systemów łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem. Elektroniczne systemy sterowania związane z bezpieczeństwem obejmują sprzęt i oprogramowanie. Dlatego wymagane jest, aby w analizach bezpieczeństwa brać pod uwagę obie części systemu w całym cyklu ich życia. Według [52] cykl życia systemu rozpoczyna się od fazy projektowej i koncepcji a kończy na likwidacji i usunięciu systemu. Aby system/podsystem/urządzenie związany z bezpieczeństwem mógł być uznany za odpowiednio bezpieczny, powinny być wg [53] spełnione trzy warunki:

1. Świadcstwo zarządzania jakością – wymaga, aby urządzenie przez cały cykl życia pozostawało pod nadzorem sprawnego systemu zarządzania jakością. Przeznaczeniem tego procesu jest minimalizacja częstości występowania błędów ludzkich i tym samym redukcja ryzyka defektów systematycznych;
2. Świadcstwo zarządzania bezpieczeństwem – wymaga, aby bezpieczeństwo systemu było zawsze zarządzane przez skuteczny proces zarządzania bezpieczeństwem. Przeznaczeniem tego procesu jest dalsza redukcja częstości występowania błędów ludzkich;
3. Świadcstwo bezpieczeństwa funkcjonalnego i technicznego – wymaga, wyjaśnienia zasad technicznych, które zapewniają bezpieczeństwo projektu i zawierać dowody wspomagające takie, jak obliczenia, specyfikację i wyniki badań oraz analizy bezpieczeństwa.

Świadcstwa dokumentujące, że wszystkie te warunki są spełnione, powinno być zawarte w specjalnym dokumencie uzasadniającym bezpieczeństwo, zwanym Dowodem bezpieczeństwa. Dokument ten jest częścią świadcstwa, obejmującego całość zagadnienia, przekazywanego właściwemu organowi ds. bezpieczeństwa, w celu otrzymania aprobaty bezpieczeństwa wyrobu. W Polsce organem ds. bezpieczeństwa jest Urząd Transportu Kolejowego. Obecne podejście do bezpieczeństwa systemów opiera się na założeniu, że bezpieczeństwo polega zarówno na stosowaniu odpowiednich środków w celu uniknięcia uszkodzeń systematycznych, jak i na stosowaniu odpowiednich środków do kontroli uszkodzeń losowych. Dla określenia dopuszczalnego poziomu tych ostatnich stosuje się współczynnik ilościowy THR – współczynnik tolerowanego zagrożenia na godzinę i na funkcję. Dla przykładu wynosi on: $10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$ i jest to ilościowy cel bezpieczeństwa. Jednak zgodnie z założeniem dla osiągnięcia optymalnego poziomu bezpieczeństwa systemu środki przeciwdziałania przyczynom losowym i systematycznym powinny być zrównoważone. Aby to osiągnąć wprowadzono koncepcję poziomów nienaruszalności bezpieczeństwa [53]. Stosuje się to w celu dopasowania podejścia jakościowego (uszkodzenia systematyczne) do podejścia ilościowego THR (uszkodzenia losowe), ponieważ nie można określić ilościowo uszkodzeń systematycznych. Wyróżniono, zatem cztery poziomy SIL, gdzie poziom 4 ma najwyższy poziom nienaruszalności bezpieczeństwa, poziom 1 najniższy. Jest jeszcze poziom 0, który oznacza, że nie ma wymagań dotyczących bezpieczeństwa.

Na podstawie przyjętego właściwego tolerowanego współczynnika THR określa się za pomocą tablicy poziom SIL wymagany dla funkcji systemu związanych z bezpieczeństwem. Poziom nienaruszalności bezpieczeństwa SIL jest liczbą, która wskazuje na stopień zaufania, że system spełni określone funkcje bezpieczeństwa w odniesieniu do uszkodzeń systematycznych. Osiągnięcie wymaganego poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa wymaga zgodności spełnienia warunku ilościowego i jakościowego. W Polsce każdy system sterowania a także typ napędu zwrotnicowego oraz rozjazdu kolejowego ma spełniać najwyższy poziom bezpieczeństwa i zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury (Dz. U. Nr.175, poz.1706 z dnia 26 września 2003r) [65] musi być on potwierdzony świadectwem dopuszczenia do eksploatacji wydanym przez Urząd Transportu Kolejowego [71].

1.2. Diagnostyka techniczna urządzeń sterowania ruchem kolejowym w Polsce

Dla urządzeń infrastruktury kolejowej niezawodność jest szczególnie ważnym kryterium decydującym o ich jakości. Poprzez podejmowane działania serwisowe możliwe jest zapewnienie wymaganego przez użytkownika poziomu ich niezawodności. Rozjazd sterowany napędem zwrotnicowym stanowi odpowiedzialny i krytyczny element drogi kolejowej. Szczególnie, że pracuje w ciężkich warunkach atmosferycznych charakteryzujących się dużą zmiennością oraz nieprzewidywalnością. Aby zapewnić odpowiednio wysoki poziom niezawodności i bezpieczeństwa tego układu, dzisiejszy system diagnostyki technicznej tych urządzeń w Polsce oparty jest na cyklicznych przeglądach stanu. Zabudowę urządzeń oraz ich przekazanie do eksploatacji wykonuje się wg specjalnych wytycznych [89], [88]. Natomiast późniejsze przeglądy i konserwacje odbywają się bez uwzględnienia rzeczywistych potrzeb wg ściśle opracowanych instrukcji np. [34] [31]. Czasookresy przeglądów i badań są zależne od kategorii linii kolejowej oraz rodzaju toru, na których dane urządzenia są eksploatowane. Dla elektrycznego napędu zwrotnicowego konserwację i sprawdzenie pracy podczas przestawiania zwrotnicy należy wykonać w terenie, co dwa tygodnie [32]. Dodatkowo raz na 2 miesiące należy dokonać sprawdzenia sił nastawczych w elektrycznych napędach zwrotnicowych w torach głównych a raz na 6 miesięcy w torach bocznych. Natomiast raz na rok należy dokonać szczegółowego przeglądu elektrycznego napędu

zwrotnicowych związanego między innymi ze sprawdzeniami luzów i zużyciu części składowych [32].

Pomiary siły nastawczej elektrycznego napędu zwrotnicowego oraz sił oddziaływania rozjazdu na napęd w końcowym położeniu i podczas przestawiania napędów należy również wykonywać wg [31] podczas badania technicznego rozjazdów. Czasookres tych badań określony jest w "Instrukcji o oględzinach, badaniach i utrzymaniu rozjazdów" [33]. Dla rozjazdów leżących w torach głównych zasadniczych i głównych dodatkowych linii magistralnych i pierwszorzędnych badania techniczne należy wykonywać nie mniej niż raz w miesiącu. Dla leżących we wszystkich torach linii drugorzędnych i znaczenia miejscowego oraz w torach stacyjnych nie mniej niż raz na dwa miesiące. Jak widać przeglądy i badania odbywają się bardzo często a wynika to głównie z konieczności zapewnienia odpowiednio wysokiego poziomu niezawodności i bezpieczeństwa układu napęd-zwrotnica. Jego stan wpływa bezpośrednio na bezpieczeństwo przejazdu pociągu przez rozjazd. Sprawdzenia napędów wg. [32], czyli raz na dwa tygodnie wykonuje służba odpowiedzialna za urządzenia sterowania ruchem kolejowym natomiast sprawdzenia wg [33] raz na miesiąc wykonuje służba odpowiedzialna za utrzymanie rozjazdów. Przyjmując, że średnie okresowe sprawdzenie działania napędu wykonywane jest, co dwa tygodnie to na stacji z ilością 100 zwrotnic, przy średnim czasie sprawdzenia wynoszącym 45 min, w przypadku 2 osób wykonujących sprawdzenia w czynnych torach, przy kosztach roboczogodziny 30 PLN, sumaryczny nakład na utrzymanie wyniesie 117 000 PLN w skali roku. Co w przeliczeniu na 1 zwrotnicę daje koszt w wysokości 1170 PLN. W skali kraju przyjmując, że w eksploatacji znajduje się ok. 20 000 zwrotnic sterowanych elektrycznie roczny koszt przeglądów diagnostycznych wynosi ponad 23 mln PLN rocznie.

Jednoznacznie pokazuje to jak znaczne środki są ponoszone na utrzymanie i zapobieganie możliwym awariom urządzeń sterowania ruchem kolejowym oraz że istnieje szerokie pole możliwych oszczędności.

1.3. Systemy diagnostyki kolejowej na świecie

Na świecie prowadzi się prace nad monitorowaniem stanu oraz wykrywaniem uszkodzeń w kolejowych napędach zwrotnicowych, patrz np. [58],[94],[95]. W [95] wykrywanie i prognozowanie uszkodzeń napędu zwrotnicowego osiąga się przez przetwarzanie różnorodnych informacji: prądu i napięcia zasilania, szumów elektrycznych, temperatury, siły nastawczej silnika, czasu zadziałania napędu, spadku napięcia zasilania itp. Przetwarzanie danych polega zarówno na analizie zdarzeń, która koncentruje się na poszczególnych parametrach rozważanych zmiennych jak i tendencji w zakresie danych, które przeszukują wykresy pod kątem znalezienia odchyłeń mogących doprowadzić do uszkodzenia. W [58] i [94] monitorowanie stanu oparte jest na analizie dwóch różnych rodzajów przebiegów: prądu i napięcia zasilania urządzenia. System na podstawie zarejestrowanych sekwencji prądu i napięcia wykrywa uszkodzenia o charakterze przyrostowym, w szczególności te związane z postępującym zwiększeniem obciążenia siłą tarcia spowodowaną zmniejszeniem smarowania oraz zużyciem elementów zwrotnicy. System do wykrywania uszkodzeń zasadniczo składa się z algorytmu dostrojonego do modelu zachowania się napędu podczas przestawiania, ale tylko w fazie przestawiania obu szyn kolejowych.

W ostatnich latach w krajach Unii Europejskiej realizowanych było również kilka projektów dotyczących systemowego zapewnienia niezawodności urządzeń infrastruktury kolejowej. Autorowi znane są następujące projekty realizowane w ramach programów ramowych Unii Europejskiej:

RAIL – Reliability Centered Maintenance (RCM) Approach for Infrastructure and Logistics of Railway Operations, którego celem była adaptacja metodyki RCM dla optymalnego prowadzenia serwisu urządzeń infrastruktury kolejowej [27]

EUROMAIN – był projektem realizowanym w latach 2002-2004. Wśród firm biorących udział były między innymi Bombardier, Alstom, Thales, Siemens. Zadaniem projektu było opracowanie, wdrożenie i weryfikacja uniwersalnego systemu utrzymania urządzeń kolejowych umożliwiającego prowadzenie monitoringu i diagnostyki urządzeń pojazdów szynowych oraz infrastruktury [87].

PROMAIN – sieć tematyczna w ramach, której prowadzone były prace na temat „Progress in Maintenance and Management of Railway Infrastructure”. Projekt zajmował się problematyką utrzymania oraz zarządzania infrastrukturą kolejową [28].

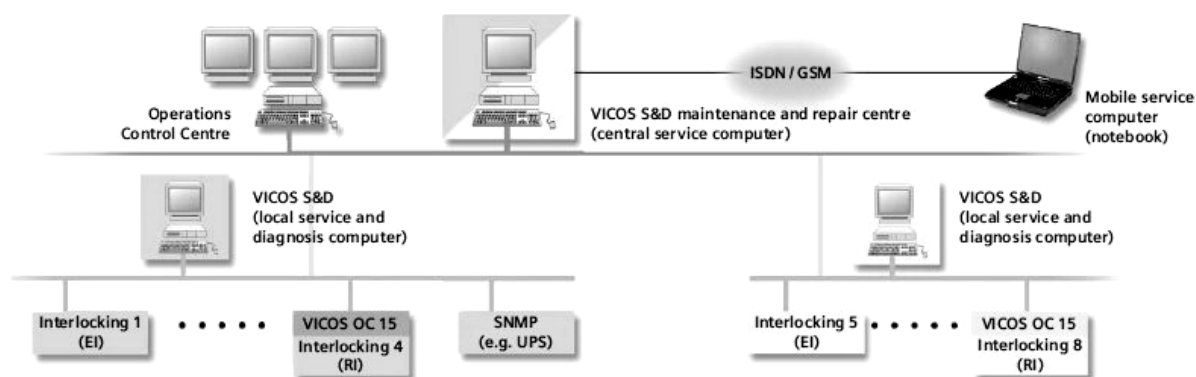
Dla większości z tych projektów celem była aplikacja metodyki i procedur RCM (ang. Reliability Centered Maintenance) dla specyfiki prowadzenia serwisu wybranych urządzeń infrastruktury kolejowej i pojazdów w różnych krajach Unii Europejskiej. Znane są w praktyce stosowane systemy pozwalające na diagnozowanie wybranych parametrów stanu pojazdów szynowych oraz niektórych elementów pojazdów i infrastruktury jak np. urządzenia automatycznej kontroli geometrii kół pojazdów szynowych, automatyczna kontrola temperatury łożysk. Rozwiązania te funkcjonują z reguły samodzielnie i nie są wykorzystywane w ramach centrów diagnostycznych.

Czołowi producenci urządzeń infrastruktury kolejowej, a także firmy specjalizujące się w systemach wspomagających mają w swojej ofercie systemy wspomagające zarządzanie infrastrukturą przeznaczone dla operatorów linii kolejowych.

Do takich rozwiązań należą np.:

- system VICOS S&D (Vehicle and Infrastructure Control and Operating System) [81] oferowany przez firmę Siemens,
- RIES (Computer Supported Maintenance Machine for Electronic Interlocking Systems) [50] oferowany przez firmę Thales,
- Optram (Railway Maintenance Decision Support System) [57] oferowany przez amerykańską firmę Bentley,
- SURVAIG® NG (Remote condition monitoring and predictive maintenance of points and crossings) [69] oferowany przez firmę Vossloh.

Przykładową architekturę systemu zbudowanego w oparciu moduły VICOS, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. System zarządzania infrastrukturą oparty na modułach VICOS

Systemy wspomagające są przystosowane do współpracy z odpowiednimi urządzeniami jedynie tego samego producenta. Większość z oferowanych rozwiązań wykorzystuje informacje o stanie urządzeń, generuje odpowiednie alerty i powiadomienia a także archiwizuje i wizualizuje informacje o uszkodzeniach. Część z nich podaje również zalecenia dla służb serwisowych dotyczące usunięcia usterek, ale dotyczy to głównie komponentów systemu sterowania a nie urządzeń przytorowych. Wyjątek stanowi system SURVAIG® NG, który jest dedykowany do monitorowania i utrzymania rozjazdów oraz skrzyżowań kolejowych z wykorzystaniem dodatkowych czujników instalowanych przy torze.

1.4. Metody i techniki stosowane w diagnostyce maszyn i urządzeń

Prowadzenie serwisu urządzeń według bieżącego stanu opiera się na podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych na podstawie bieżącej oceny stanu technicznego maszyn, ich zespołów lub elementów. Poprawna realizacja tej strategii wymaga skutecznych metod i środków diagnostyki technicznej oraz przygotowanego personelu technicznego. Poprzez różnorodne metody diagnostyczne, możemy uzyskać informację o aktualnym stanie maszyny. Badanie diagnostyczne ogólnie składa się z odebrania sygnału emitowanego przez maszynę, wydzielenia w nim charakterystycznych cech i porównania ich z cechami sygnałów odpowiadających możliwym stanom maszyny. Wynikiem tego badania jest ustalenie klasy stanu maszyny określonej na podstawie przynależności obecnego stanu maszyny do

jednej z klas z wcześniej ustalonej klasyfikacji stanów. Podstawowy zbiór wymagań stawianych przed skutecznymi metodami diagnostycznymi to: zbiór możliwych stanów maszyny, zbiór sygnałów diagnostycznych, odwzorowanie zbioru sygnałów w zbiór stanów lub odwrotnie, źródła zakłóceń, kryteria efektywności diagnozy [96],[80],[97],[98].

Jeżeli chodzi o kryteria decydujące o wyborze metody diagnozowania to do najważniejszych można zaliczyć:

- stopień ważności uszkodzenia, które sygnalizuje wykorzystywana metoda i urządzenie, rozpatrywane pod kątem finansowym (kosztów zakupu, napraw czy strat finansowych z tytułu przestojów maszyny);
- stopień złożoności badań diagnostycznych określoną metodą, wynikający z konieczności zatrudnienia załogi o wysokich kwalifikacjach do ich przeprowadzenia
- koszt związany z zakresem prac przygotowawczych i realizacją programu badań;
- czas realizacji programu badań diagnostycznych;
- dokładność uzyskiwanych wyników;
- stopień wiarygodności wyników;
- stopień trudności adaptacji metody i urządzenia dla celów diagnostyki w aspekcie kosztów lub czasu jej trwania;
- stopień złożoności metody i urządzenia diagnostycznego w aspekcie kosztów poniesionych na ich zakup i zainstalowanie [96].

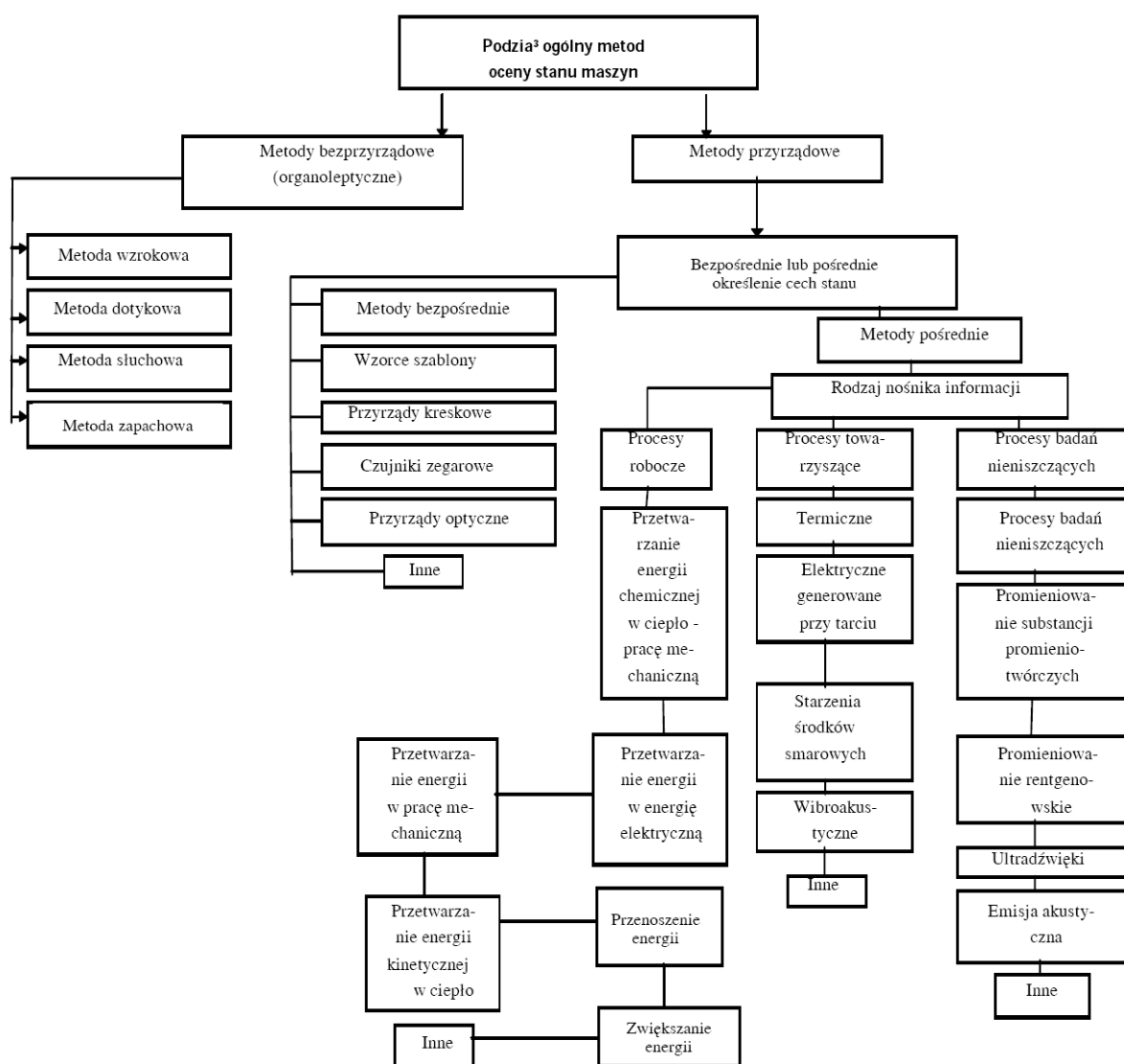
Ogólny podział metod diagnozowania, można dokonać według następujących kryteriów [98],[7],[6],[77],[96]:

- stopień subiektywizmu badań diagnostycznych (rys. 3);
- rodzaj modelu diagnostycznego;
- stopień automatyzacji.

Metody badań diagnostycznych ze względu na stopień subiektywizmu badań dzieli się na metody bezprzyrządowe (organoleptyczne) i przyrządowe. Te pierwsze wynikają z istniejących jeszcze doświadczeń w praktyce przemysłowej, ale ze względu na złożoność współczesnych maszyn oraz zanikanie kadry diagnostycznej dominującą rolę przejmują metody przyrządowe. Te z kolei dzielimy na: metody bezpośrednie i metody pośrednie. Jeżeli w metodach pośrednich przyjmiemy za kryterium podziału rodzaj nośnika informacji o stanie maszyn, to metody diagnostyczne dzieli się na metody oparte na pomiarze wartości parametrów

procesów roboczych, towarzyszących (reszkowych), badań nieniszczących oraz jakości wytworów.

Metody diagnostyczne rozpatrywane pod kątem rodzaju modelu diagnostycznego dzieli się na zdeterminowane, oparte są na modelach deterministycznych, które wykorzystują jednoznaczną zależność przyczynowo-skutkową między cechami stanu a parametrami sygnałów diagnostycznych oraz niezdeterminowane (probabilistyczne), w których poszukiwanie związków przyczynowo-skutkowych może prowadzić do rozważań w kategoriach prawdopodobieństw.



Rys. 3. Metody organoleptyczne i przyrządowe w diagnostyce maszyn [96]

Metody badań diagnostycznych rozpatrywane ze względu na stopień automatyzacji procesu dzieli się na metody automatyczne, półautomatyczne i ręczne.

W ręcznych metodach diagnozowania maszyn, kolejność i jakość wykonywanych sprawdzeń zależy bezpośrednio od użytkownika. Badania i ocena stanu maszyny trwa długo i jest mało efektywna.

Metody półautomatyczne charakteryzują się mniejszym udziałem człowieka w procesie diagnozowania, jednak nie wykluczają go z tego procesu, szczególnie jeżeli chodzi o sterowanie i wnioskowanie diagnostyczne.

W metodach automatycznych wykonanie sprawdzeń, analiza wyników i wydanie decyzji o stanie maszyny odbywa się poprzez układ decyzyjny, bez ingerencji człowieka. Personel diagnostyczny wykonuje jedynie czynności pomocnicze, np. odbiór wyników badania, czynności obsługowe urządzenia diagnostycznego.

Dla procesu diagnozowania istotne znaczenie mają zastosowane metody pomiarowe i wykorzystywane przy tym środki techniczne. Wybór ich jest uzależniony od rodzaju diagnozowanego obiektu i wykorzystywanych parametrów diagnostycznych, jak również zakresu i miejsca diagnozowania w procesie istnienia maszyny. W procesie przetwarzania informacji diagnostycznej oraz wnioskowania o stanie maszyny rola człowieka, zostaje stopniowo ograniczana przez inteligentne systemy diagnostyczne. Dotychczasowe ręczne metody polegające na kolejnym podłączaniu przyrządów pomiarowych do punktów kontrolnych i podejmowaniu decyzji na podstawie wyników pomiarów są stopniowo eliminowane. W miejsce tych systemów wprowadza się mikroprocesorowe automatyczne systemy monitorowania, i diagnozowania [96]. Stosowanie ich przynosi zwykle wymierne korzyści ekonomiczne. Na przestrzeni ostatnich lat systemy tego typu są coraz powszechniej wykorzystywane w zakresie diagnostyki i eksploatacji maszyn. Dlatego wydaje się możliwe zastosowanie ich również w technice kolejowej a w niniejszej pracy zostanie podjęta próba opracowania automatycznego systemu diagnozowania napędu zwrotnicowego.

1.4.1 Diagnostyka według modelu

Rozwój diagnostyki według modelu nierozzerwalnie jest związany z rozwojem systemów komputerowych i inżynierii oprogramowania. Polega ona w skrócie na zbudowaniu spójnego modelu komputerowego obiektu, który pozwoli na wygenerowanie wiarygodnych relacji diagnostycznych oraz zaawansowaną analizę stanów normalnych i z defektami.

Poprzez symulację pracy obiektu pozwala to:

- Modelowanie defektów
- Budowa relacji defekt–symptom
- Budowa map obszarów wrażliwości i akceptacji

Taka wiedza symulacyjna może doskonale uzupełniać wiedzę eksploatatora i inżyniera praktyka oraz stanowić cenne źródło pozyskiwania wiedzy diagnostycznej. Dzięki temu diagnostyka według modelu może być szczególnie pomocna w budowie baz wiedzy systemów eksperckich. Potwierdzają to również techniki pozyskiwania informacji metodą odwracania modeli obiektów [8].

Może to się przyczynić w przyszłości do intensywnego rozwijania systemów z automatycznym wnioskowaniem lub też inaczej ze „sztuczną inteligencją”.

Metody diagnostyki według modelu mogą być użyteczne w wielu praktycznych zastosowaniach i szczególnie stają się przydatne, gdy pozyskanie materiału eksperymentalnego na ogół jest trudne a czasami wręcz niemożliwe. Jednym z przykładów zastosowań diagnostyki według modelu może być identyfikacja pęknięć wałów, a zwłaszcza próba znalezienia symptomów diagnostycznych tego stanu [39],[37]. W wyniku przeprowadzonych powyższych badań uzyskano bardzo cenne informacje, które bez analizy komputerowej właściwej dla diagnostyki według modelu nie byłoby możliwe uzyskać. Kolejnym przykładem może być analiza stanu łożysk ze smarowaniem hybrydowym poprzez kieszenie lewarowe i pracujące w warunkach tzw. „przekoszenia” panwi [38]. Również w tym przypadku uzyskano cenne informacje, co wskazuje na duże możliwości analizy komputerowej i diagnostyki według modelu.

Na podstawie powyższej analizy wydaje się, że zastosowanie takiej metody jest zasadne dla urządzeń infrastruktury kolejowej.

1.4.2 Przegląd metod wykorzystywanych w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych

Zadanie diagnostyczne jest problemem polegającym na przekształceniu przestrzeni informacji w odpowiadającą jej przestrzeń uszkodzeń. Tradycyjnie zadanie to było rozwiązywane poprzez wykorzystanie różnych metod wymagających specyficznej wiedzy eksperckiej. Konieczność korzystania z wyszkolonego i doświadczonego personelu powodowała, że diagnozowanie jest procesem długotrwałym i kosztownym. Z tego powodu obserwowany jest ciągły i bardzo gwałtowny rozwój metod automatycznego diagnozowania.

Obecnie rozwijanych jest szereg różnych metod umożliwiających realizację automatycznej diagnostyki maszyn i urządzeń. Pierwszą grupę metod diagnostycznych stanowią podejścia wykorzystujące metody statystyczne.

Problem wykrywania uszkodzeń sprowadza się w nich zazwyczaj do zagadnienia testowania hipotez, przy wykorzystaniu informacji pochodzącej z istniejących urządzeń monitorujących [96].

Innym stosowanym podejściem jest statyczna kontrola procesów (SPC) wykorzystywana początkowo jako narzędzie kontroli jakości produkcji. Głównym zadaniem SPC jest dokonywanie pomiaru odchylenia bieżących wartości sygnałów diagnostycznych od sygnału referencyjnego reprezentatywnego dla pracy elementu bez uszkodzenia i sprawdzeniu czy wartość odchylenia znajduje się w dopuszczalnym limicie. Kolejną metodą diagnostyczną jest analiza skupień. Jest to statystyczna metoda klasyfikująca pozwalająca grupować sygnały w odpowiadające im stany uszkodzeń. W praktyce stosowanych jest wiele algorytmów klasyfikujących, a najpopularniejszymi są algorytm najbliższego sąsiedztwa (ang. Nearest Neighbour] i algorytm k-średnich (ang. k-means) [23],[46],[45]. Wśród pozostałych metod diagnostycznych bazującą na statystyce wyróżnić można metodę wykorzystującą ukryty model Markowa [21].

Kolejna znaczącą grupę metod diagnostyki stanów maszyn stanowią metody bazujące na wykorzystaniu sztucznej inteligencji AI [3],[43],[54],[73],[74]. Metody te wykazują lepszą skuteczność w porównaniu z metodami klasycznymi. Wśród metod tych wyróżnić można kilka narzędzi takich jak:

- § Sztuczne sieci neuronowe,
- § Modele rozmyte,

§ Algorytmy ewolucyjne

Sztuczne sieci neuronowe są modelami obliczeniowymi, które pozwalają naśladować sposób myślenia człowieka. Składają się z prostych elementów przetwarzających, które łączy się w bardziej rozbudowane struktury. Sztuczna sieć neuronowa dokonuje aproksymacji złożonej funkcji nieliniowej o wielu wejściach i wielu wyjściach. Sieć taka uczy się przez dobór wag poszczególnych elementów przetwarzających na podstawie dostarczonego zbioru uczącego zawierającego obserwacje wejść i wyjść. W diagnostyce maszyn wykorzystywanych jest bardzo wiele typów sieci neuronowych.

Kolejną grupę metod stanowią metody wykorzystujące algorytmy ewolucyjne. Ich działanie opiera się na naśladowaniu procesu ewolucji populacji rozwiązań. Najczęściej wykorzystywanymi algorytmami ewolucyjnymi są algorytmy genetyczne. Metody te pozwalają w prosty sposób znaleźć ekstrema funkcji wielomodalnych, przez co z powodzeniem mogą być wykorzystywane w zagadnieniach lokalizacji uszkodzeń [61].

Obecnie w bardzo wielu systemach diagnostycznych spotykane jest stosowanie rozwiązań hybrydowych pomagających w znaczący sposób zwiększyć skuteczność działania systemów diagnostycznych.

Prognozowanie stanu maszyn jest kluczowym problemem w planowaniu czynności serwisowych. W porównaniu z diagnozowaniem, problem prognozowania stanu jest stosunkowo słabo prezentowany w literaturze. W praktyce spotyka się dwa typy prognozowania. W jednym z nich prognozowany jest czas, jaki pozostał do wystąpienia uszkodzenia lub niezdatności eksploatacyjnej. Prognoza taka tworzona jest na podstawie bieżącego stanu oraz dostępnej historii eksploatacyjnej [96].

Prognozowanym parametrem jest w tym przypadku RUL (ang. Remaining Useful Life) prognozowany czas poprawnej pracy urządzenia. W części przypadków pożądanym jest nie tyle wskazanie samej wartości RUL, lecz określenie prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy urządzenia w określonym nadchodzącym horyzoncie czasowym. Prognozowanie wymaga wiedzy związanej z procesem rozwoju uszkodzenia jak również wiedzy związanej z mechanizmem jego powstawania. Proces rozwoju uszkodzenia jest z reguły śledzony poprzez analizę trendu zmian stanu. Wyróżniamy dwa sposoby opisu uszkodzenia:

§ Definicja uszkodzenia poprzez poziom graniczny

§ Definicja uszkodzenia bazująca na modelu zbudowanym w oparciu o dostępne dane historyczne

Do prognozowania RUL stosuje się obecnie szereg różnych metod, w tym metody sztucznej inteligencji [90]. W ostatnich latach prognozowanie stanu maszyn jest stosowane w doborze strategii serwisowych. Pozwala to na optymalizację tychże strategii w odniesieniu do specyficznych kryteriów takich jak planowany poziom ryzyka, kosztów eksploatacyjnych czy niezawodności eksploatacyjnej. W szczególności pozwala to na optymalizację okresów, w jakich należy dokonywać monitorowania stanu. Podejście takie wydaje się być zasadne i zarazem perspektywiczne w przypadku urządzeń infrastruktury kolejowej. W przypadku systemu diagnostyki obejmującego urządzenia rozproszone w terenie, ustalenie optymalnej częstotliwości monitorowania oraz podejmowania czynności prewencyjnych przekłada się bezpośrednio na ponoszone koszty serwisowania urządzeń [90]. Należy jednak zaznaczyć, że prognozowanie stanu obiektów technicznych jest zadaniem bardzo trudnym, a uzyskane w praktyce wyniki obarczone są dużym błędem.

1.5. Cel i zakres pracy

Wydaje się, że możliwy jest do zrealizowania automatyczny system diagnostyczny, układu napęd zwrotnicowy – zwrotnica, który umożliwi wyznaczenie parametrów układu i procesów degradacji, jakie zachodzą w trakcie pracy i eksploatacji. Za jego pomocą, nieprawidłowości oraz potencjalne usterki mogłyby być szybciej i lepiej wykrywane poprzez kontrolę urządzenia podczas jego działania a nie tylko w czasie inspekcji/kontroli. Możliwe staje się wtedy przewidywanie niesprawności oraz indywidualne planowanie konserwacji lub napraw dla konkretnych napędów i zwrotnic. Dzięki temu zwiększy się ich dostępność oraz bezpieczeństwo działania. Oczekuje się, że dzięki takiemu podejściu możliwa będzie znacząca eliminacja lub redukcja poziomu ryzyka związanego z wystąpieniem niespodziewanych awarii, a także uzyskanie wymiernych korzyści ekonomicznych. Oszacowanie analityczne kosztów serwisowania w przypadku serwisowania według stanu jest trudne, ponieważ czasy podjęcia działań serwisowych są związane z rejestrowanymi wartościami zmiennych procesowych. Można jednak przyjąć, bez popełnienia dużego błędu, że wydłuża się czas bezawaryjnej pracy urządzenia, co

daje wymierne korzyści finansowe. Na podstawie dokonanego przeglądu metod diagnostycznych wydaje się, że w tym przypadku można wykorzystać diagnostykę według modelu oraz metody bazujące na wykorzystaniu sztucznej inteligencji np. sztuczne sieci neuronowe. Rozwiązanie to umożliwi bezpośrednie wykorzystanie informacji przychodzącej z układu diagnostycznego lub z okresowych pomiarów kontrolnych, w celu osiągnięcia maksymalnego czasu eksploatacji urządzenia przy minimalnym ryzyku.

Celem pracy jest sformułowanie procedury diagnozowania oraz zbudowanie systemu monitorowania układu napęd zwrotnicowy – zwrotnica oraz jego przetestowanie w warunkach eksploatacyjnych.

Teza: Jest możliwe zrealizowanie systemu diagnozowania napędu zwrotnicowego z zastosowaniem systemu opartego na metodach AI.

Dla osiągnięcia tak sformułowanego celu pracy zrealizowano następujące zadania badawcze:

- Dokonano analizy istniejących konstrukcji napędów pod kątem możliwości monitorowania ich stanu
- Opracowano model dynamiki napędu i rozjazdu umożliwiające symulację zachowań obiektu nieuszkodzonego oraz z wybranymi uszkodzeniami
- Opracowano procedurę diagnozowania stanu z zastosowaniem modelu dynamiki napędu i rozjazdu
- Dokonano weryfikacji procedury metodą symulacji modelu dynamiki napędu i rozjazdu
- Wykonano prototyp systemu monitorowania oraz wykonano jego badania na stanowisku laboratoryjnym
- Przeprowadzono badania eksploatacyjne wykonanego prototypu
- Opracowano procedurę diagnozowania w oparciu o algorytmy AI

Dla celów wyboru mierzonych wielkości i sposobu realizacji systemu monitorowania przeprowadzono analizę awaryjności eksploatowanych napędów. Analiza ta stanowiła podstawę wyboru symptomu diagnostyczny na potrzeby systemu monitorowania i diagnostyki stanu technicznego układu napęd-zwrotnica.

Treść pracy podzielono na 9 rozdziałów, w których dokonano przeglądu metod i technik stosowanych w diagnostyce maszyn i urządzeń oraz na kolei. Przeanalizowano istniejące konstrukcje napędów zwrotnicowych, zaproponowano i wykonano prototyp systemu monitorowania stanu napędu, opisano przeprowadzone badania i symulacje oraz zaproponowano procedurę diagnozowania z wykorzystaniem sieci neuronowych.

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do zagadnień związanych z tematyką pracy. Zawarto w nim krótką charakterystyką problematyki serwisowania urządzeń infrastruktury kolejowej, oraz dokonano przeglądu metod i technik stosowanych w diagnostyce maszyn i urządzeń. Sformułowano w nim również cel pracy oraz zdefiniowano konieczne do zrealizowania zadania badawcze.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu rozwiązań napędów zwrotnicowych a także przeprowadzono analizę stosowanych w Polsce napędów pod kątem ich możliwości diagnozowania.

W rozdziale trzecim omówiono metodykę serwisowania zgodną z ideą RCM, przyjętą metodykę przeprowadzonych badań awaryjności układu napęd-zwrotnica oraz wyniki tych badań eksploatacyjnych.

Rozdział czwarty zawiera opis badań symulacyjnych opracowanego modelu komputerowego oraz przeprowadzone symulację zachowań obiektu nieuszkodzonego oraz z wybranymi uszkodzeniami.

Rozdział piąty opisuje wykonany prototyp systemu monitorowania. Przeprowadzono w nim weryfikację przyjętego sposobu pomiarowego poprzez testy laboratoryjne oraz badania w różnych temperaturach otoczenia.

Walidację działania systemu monitorowania przeprowadzono poprzez badania terenowe, które opisano w rozdziale szóstym.

W rozdziale siódmym przedstawiono koncepcje systemu diagnozowania z wykorzystaniem opracowanego systemu monitorowania a także procedurę diagnozowania stanu napędu w oparciu o algorytmy AI.

W rozdziale ósmym zawarto podsumowanie przeprowadzonych badań oraz zamieszczono wnioski i uwagi końcowe.

Rozdział dziewiąty zawiera zestawienie najważniejszych pozycji literaturowych związanych z tematem pracy.

2. Przegląd rozwiązań napędów zwrotnicowych i ich analiza pod kątem możliwości diagnozowania.

2.1. Napędy zwrotnicowe – definicja, przeznaczenie, funkcje

Napędy zwrotnicowe są urządzeniami wykonawczymi systemów sterowania i zabezpieczania ruchu pociągów. Na polecenie operatora nadrzędnego nastawni system sterowania podaje napięcie nastawcze do napędu i następuje przestawienie iglic zwrotnicy w przeciwne położenie. Proces ten trwa kilka sekund, w zależności od wersji napędu od 3 do 6 sek. Tylko w tym czasie do napędu jest podawane napięcie nastawcze (230V AC lub 3x400V AC w zależności od wersji). Natomiast przez cały czas napęd jest zasilany napięciem kontrolnym i poprzez wyłączniki krańcowe kontrolowane jest osiągnięcie położenia krańcowego iglic lub ruchomego dzioba po zakończeniu procesu przestawiania.

Napęd zwrotnicowy jest urządzeniem elektromechanicznym i spełnia następujące funkcje [15],[14],[12]:

- przestawia zwrotnice, wykolejnice lub ruchomy dziób krzyżownicy,
- utrzymuje zamknięcie nastawcze zwrotnicy lub bezpośrednio iglice lub wykolejnice w położeniach krańcowych,
- kontroluje osiągnięcie położenia krańcowego iglic lub ruchomego dzioba po zakończeniu procesu przestawiania,
- sygnalizuje rozprucie zwrotnicy (napęd rozpruwalny) poprzez utratę sygnału kontroli.

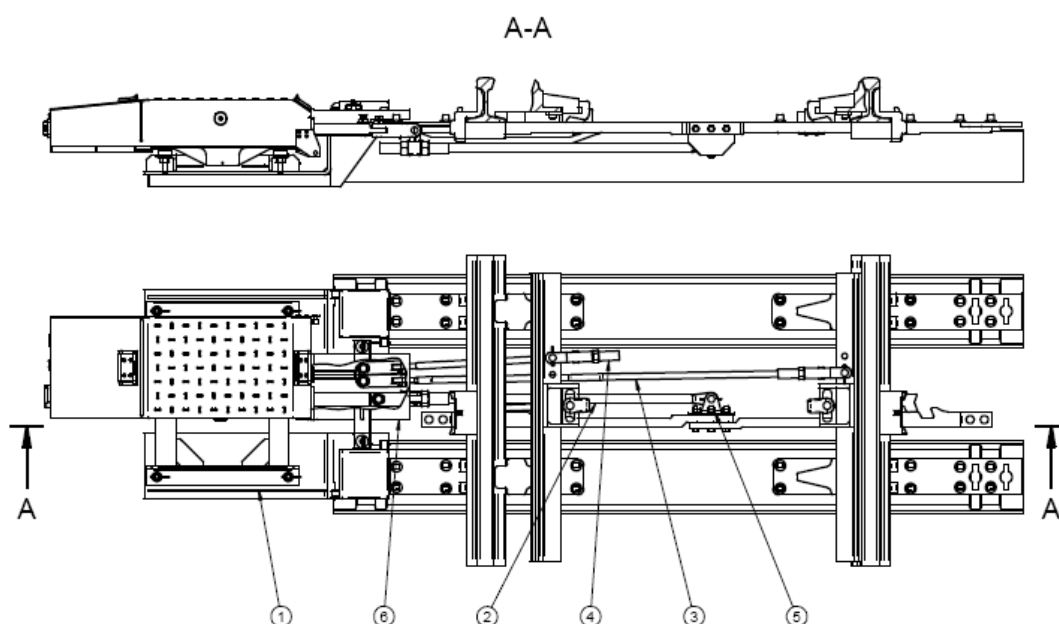
Zabudowany napęd zwrotnicowy do rozjazdu na sieci linii kolejowej pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Napęd zwrotnicowy EEA-5 zabudowany w rozjeździe.

2.2. Napędy zwrotnicowe – podział i rodzaje

Najbardziej ogólny podział napędów zwrotnicowych to podział na napędy tradycyjne i nowoczesne konstrukcje określane mianem napędów zintegrowanych. Jako napędy tradycyjne rozumie się tu napędy montowane z boku toru, zarówno równoległe, jak i prostopadłe do osi toru. Przykład takiej zabudowy pokazano na rysunku 5 i 6.



Rys. 5. Zabudowa napędu zwrotnicowego z boku toru [15]

Natomiast napędy zintegrowane są zabudowane w stalowej podrozdźnicy zastępującej tradycyjny podkład drewniany bądź betonowy. Takie rozwiązanie wynika z dążenia do automatycznego, mechanicznego podbijania rozjazdu w obszarze napędu, co w znacznym stopniu obniża koszty utrzymania rozjazdu i zwiększa bezpieczeństwo przejazdu. W przypadku rozwiązań tradycyjnych operacja podbijania rozjazdu wymaga demontażu urządzeń lub podbijania ręcznego. Przykład zabudowy takiego napędu na przykładzie napędu zintegrowanego EBI Switch 2000 pokazano na rysunku 6 a napędu TM100 na rysunku 7. W Polsce takie napędy na dzień dzisiejszy nie są jeszcze stosowane.



Rys. 6. Zintegrowany napęd zwrotnicowy EBI Switch 2000 zabudowany w rozjeździe [84].



Rys. 7. Zintegrowany napęd zwrotnicowy TM 100 zabudowany w rozjeździe [75].

Ze względu na sposób ryglowania (zamykania) iglic w rozjeździe napędy dzieli się na:

- z zamknięciami wewnętrznymi,
- bez zamknięć wewnętrznych.

Napędy bez zamknięć wewnętrznych są przewidziane do zwrotnic z zamknięciami nastawczymi i w skrajnych położeniach trzymają bezpośrednio iglice odlegającą. Natomiast napędy z zamknięciami wewnętrznymi są przewidziane do zwrotnic bez zamknięć nastawczych i w skrajnych położeniach trzymają obie iglice. Zazwyczaj napędy z zamknięciami wewnętrznymi są dopuszczone do użytkowania do niższych prędkości przejazdu taboru.

Ze względu na siłę trzymania napędu, możemy wyszczególnić następujące rodzaje napędów:

- nierozpruwalne,
- rozpruwalne

Najechnie taborem z ostrza na niewłaściwie ustawiony rozjazd z napędem rozpruwalnym powoduje tzw. rozprucie rozjazdu. Napęd rozpruwalny zostaje otwarty (następuje przesunięcie suwaka nastawczego napędu) i przekazanie informacji o utracie kontroli do obwodu kontrolnego systemu sterowania. Siła trzymania napędu jest tak dobrana, aby nie uległy zniszczeniu żadne elementy rozjazdu i napędu.

Napędy nierozpruwalne to są takie napędy, które nie są przystosowane do rozprucia rozjazdu ze względu na znacznie większą siłę trzymania tych napędów (powyżej 25kN). Rozprucie rozjazdu z napędem w wersji nierozpruwalnej powoduje konieczność wymiany napędu na nowy i naprawę rozjazdu.

2.2.1 Przegląd napędów zwrotnicowych stosowanych w Polsce.

2.2.1.1 Napęd zwrotnicowy typu EEA-4

Napęd zwrotnicowy typu EEA-4 jest produkowany w wielu wersjach i odmianach od roku 1975. Kilkanaście tysięcy tego typu napędów jest eksploatowanych na liniach kolejowych w Polsce. Budowę takiego napędu pokazano na rysunku 8. Napędy typu EEA-4 wykonywane są w następujących podstawowych rodzajach [14]:

EEA-40 - bez wewnętrznych zamknięć nastawczych, rozpruwalny, przewidziany do zwrotnic z zamknięciami nastawczymi i szybkości jazdy taboru do 120 km/godz. oraz do wykolejnic.

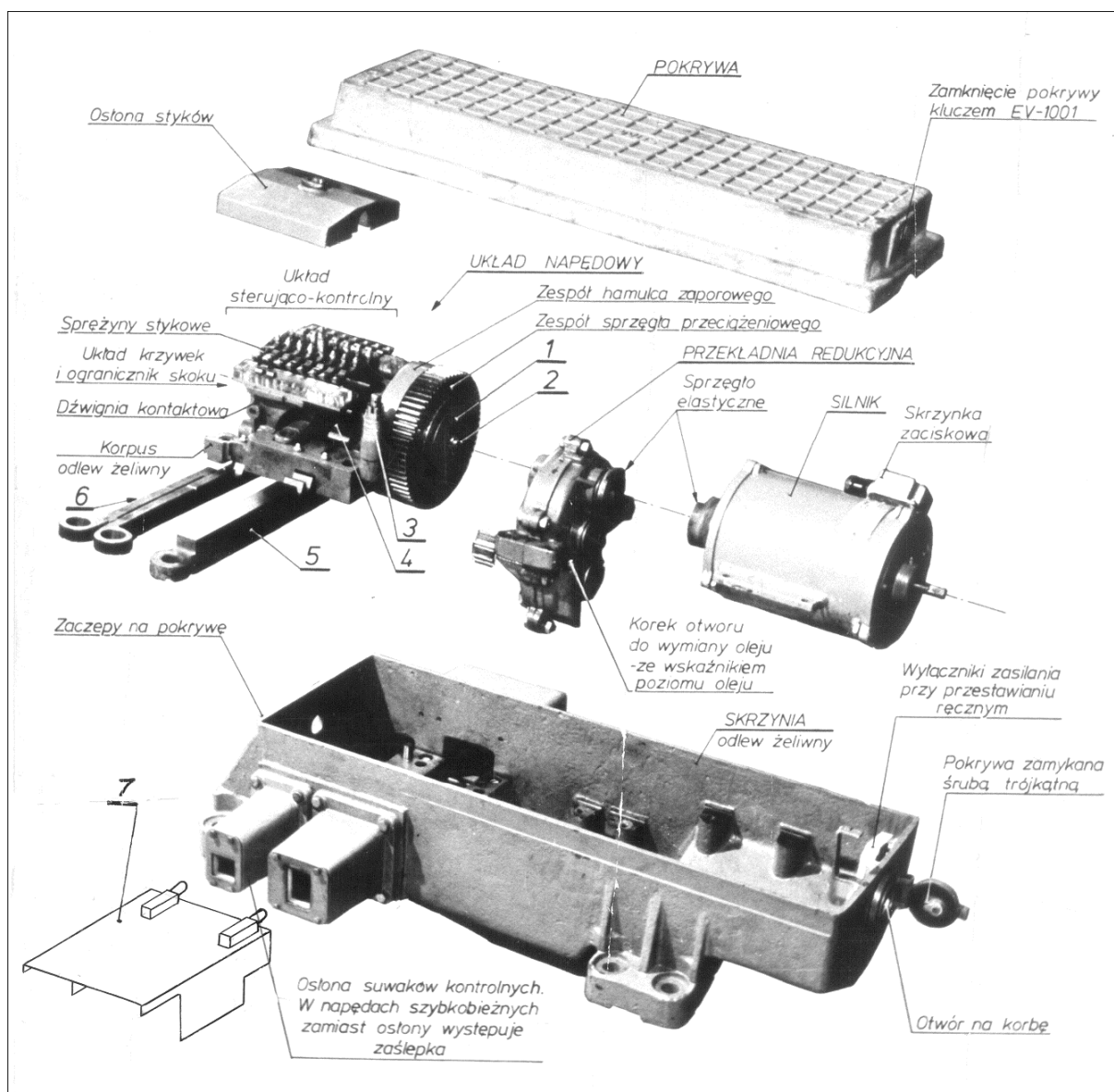
EEA-41 - bez wewnętrznych zamknięć nastawczych, nierozpruwalny, przewidziany do zwrotnic z zamknięciami nastawczymi i szybkości jazdy taboru powyżej 120 km/godz.

EEA-42 - z zamknięciami wewnętrznymi, rozpruwalny, przewidziany do zwrotnic bez zamknięć nastawczych i szybkości jazdy taboru do 120 km/godz.

EEA-43 - z zamknięciami wewnętrznymi, nierozpruwalny, przewidziany do zwrotnic bez zamknięć nastawczych i szybkości jazdy taboru powyżej 120 km/godz.

Charakterystyczne cechy:

- normalno-, wolno- i szybkobieżne o czasie przestawiania odpowiednio: 3,0; 5,0 i 0,5 sek,
- rozpruwalne i nierozpruwalne z kołkiem ścinowym,
- bez suwaków kontrolnych lub z suwakami kontrolnymi, pozwalającymi na potwierdzenie zakończenia procesu przestawiania
- o różnych napięciach silników elektrycznych pozwalających na dopasowanie do warunków zasilania (230VAC, 3x400V AC, 136V DC)
- o okablowaniach 4-7 żyłowych dla wszystkich rodzajów układów sterująco-kontrolnych stosowanych na PKP
- o różnych siłach nastawczych, trzymania i rozprucia, dostosowując je do wzrostu oporów i oddziaływań dynamicznych rozjazdów
- z przekładnią mechaniczną, sprzęgłem przeciążeniowym z tarczami ciernymi i sprężynami talerzowymi, układem cierno-rolkowym hamulca zaporowego oraz od połowy lat 90-tych z mechanicznym lub elektromagnetycznym hamulcem silnika
- waga napędu – około 160 kg



Rys. 8. Budowa napędu zwrotniczowego typu EEA-4 [14]

Zasada działania napędu EEA-4

Przestawienie napędu.

Moment obrotowy silnika przekazany zostaje poprzez przekładnię redukcyjną i zespół sprzęgło-hamulec na koło napędowe, którego obrót powoduje przesuw suwaka nastawczego. Przeniesienie momentu obrotowego ze sprzęgła przeciążeniowego na koło napędowe odbywa się za pośrednictwem występów tarczy napędowej i zaczepu zabieraka, który tak jak i koło napędowe osadzony jest na stałe na wale głównym. Podczas przestawiania napędu hamulec zaporowy jest wyłączony

z działania. Wielkość siły nastawczej reguluje się dokręcaniem nakrętek dociskających sprężyny talerzowe.

Napęd można także przestawiać ręcznie obracając wał silnika przy pomocy korby. Krzywki osadzone na stałe na wale głównym sterują zapadaniem dźwigni kontaktowych. W skrajnych położeniach napędu haki dźwigni kontaktowych zapadają w wycięcia suwaków kontrolnych i jednocześnie stykami łączą obwód kontrolny wskazując w nastawni prawidłowe położenie iglic.

Działanie napędu podczas rozprucia rozjazdu.

Rozprucie rozjazdu a tym samym i napędu następuje przy jeździe z ostrza na nieprawidłowo ustawioną zwrotnicę i polega na przesunięciu suwaka nastawczego siłą wywieraną przez koła taboru naciskające na iglicę odlegającą. Przesunięcie suwaka nastąpi po pokonaniu siły trzymania nastawionej na hamulcu zaporowym. Przesuw iglicy wywołuje, poprzez suwak nastawczy i koło napędowe, moment obrotowy w hamulcu zaporowym. Ten moment obrotowy powoduje zadziałanie hamulca zaporowego, którego siłę trzymania ustalono zaciskając pierścień oporowy przy pomocy zestawu sprężyn. W hamulcu napędu nierozpruwalnego oprócz zacisku pierścienia zastosowano także kołek ścinowy. Ścięcie kołka spowoduje zadziałanie zestawu wyłączników i rozłączenie obwodu sterującego i kontrolnego.

Opis trzymania napędu.

Hamulec zaporowy pokazany na rys.9 ma za zadanie trzymać napęd w obu skrajnych położeniach.

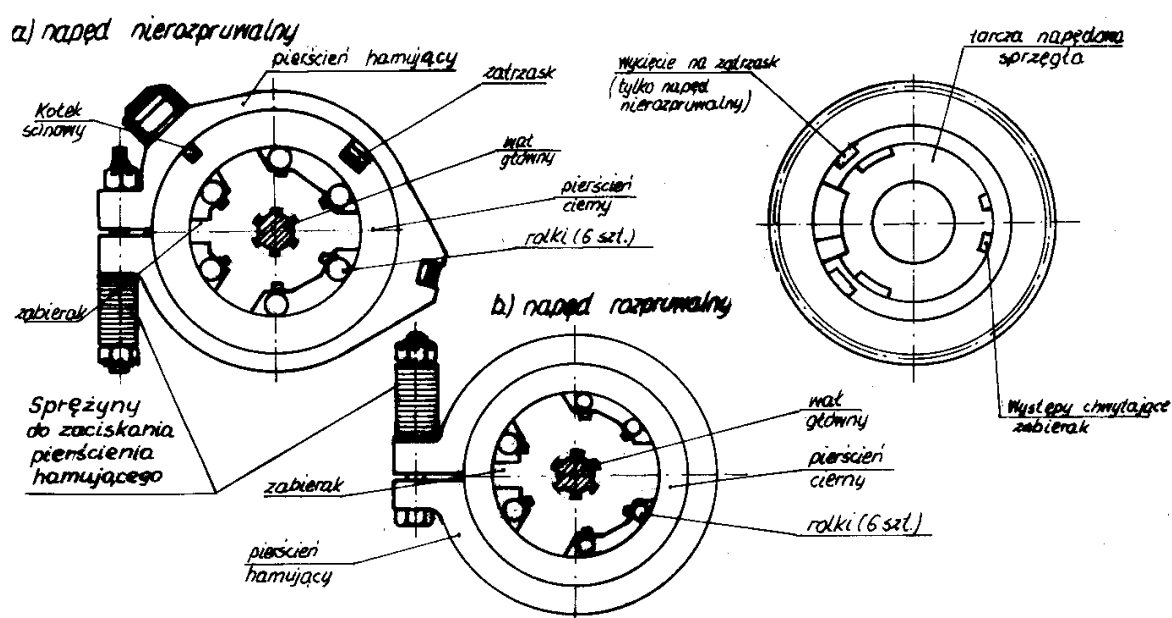
Moment obrotowy wywołany przez działanie iglicy na suwak nastawczy zostaje przeniesiony przez wał główny na zabierak powodując natychmiastowe zakleszczenie zestawu rolek (3 rolki na jeden kierunek działania) i dalsze przeniesienie momentu na pierścień cierny, który jest trzymany siłą tarcia spowodowanego zaciśnięciem pierścienia hamującego (oraz kołkiem ścinowym w napędach nierozpruwalnych).

W napędzie rozpruwalnym siłę trzymania ustala tylko zacisk pierścienia hamującego.

W napędzie nierozpruwalnym zasadniczą część siły trzymania zapewnia kołek ścinowy, który ulega zniszczeniu podczas rozpruwania rozjazdu, natomiast zaciśnięcie pierścienia hamującego służy do przyjmowania wszelkich zmiennych obciążeń występujących podczas przejazdu taboru.

W celu zagwarantowania możliwie największej niezawodności działania w hamulcu napędu nierozpruwalnego zainstalowano zatrask, który dubluje działanie zestawu rolek i zasprężła zabierak z tarczą cierną za pośrednictwem tarczy napędowej sprzęgła.

Należy podkreślić, że takie rozwiązanie hamulca zaporowego zapewnia trzymanie iglic nawet w przypadku uszkodzenia sprzęgła przeciążeniowego, przekładni lub silnika.



Rys. 9. Hamulec zaporowy napędu EEA-4 [14].

Napędy typu EEA-4 instalowane są równolegle do toru i mocowane na stalowych pasach przymocowanych do dwóch sąsiednich podkładów. Takie ustawienie wyklucza instalowanie na podrozdajnicach zespolonych i mechaniczne podbijanie rozjazdów. Jest to napęd starszego typu i obecnie odchodzi się od jego stosowania. Napęd ma dużą ilość części i wymaga częstych, pracołłonnych

zabiegów utrzymania i kontroli [31],[32] wykonywanych przez wyspecjalizowany personel. Z tego też względu utrzymanie tego napędu jest bardzo kosztowne.

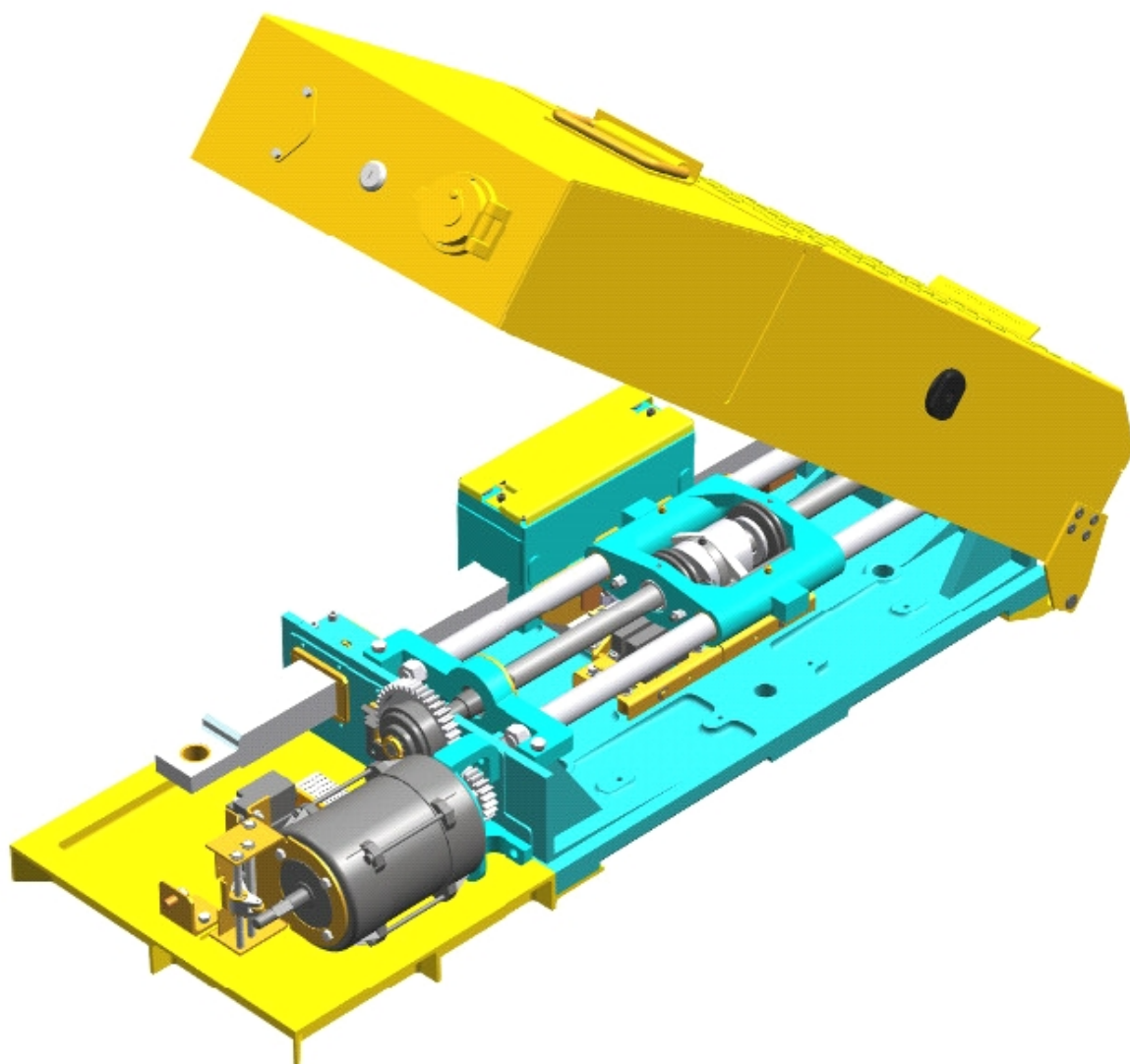
2.2.1.2 Napęd zwrotnicowy typu EEA-5

Napęd zwrotnicowy typu EEA-5 jest produkowany w wielu wersjach i odmianach od roku 1999. Ponad 2 tysiące sztuk tego typu napędów jest eksploatowanych na liniach kolejowych w Polsce. Napęd ten jest konstrukcją nowszą opartą na przekładni śrubowo-tocznej. Cechuje się budową w większym stopniu modułową z dużo mniejszą ilością części niż poprzednia konstrukcja EEA-4.

Poszczególne moduły stanowiące oddzielne wymienne części funkcjonalne to [15]:

1. Zespół płyty podstawy,
2. Moduł zamykający,
3. Moduł sterująco-kontrolny,
4. Sprzęgło siły trzymania z suwakiem nastawczym,
5. Moduł wyłącznika korby,
6. Moduł przesuwny,
7. Moduł silnika,
8. Zespół suwaków kontrolnych,
9. Dolna osłona silnika,
10. Pokrywa napędu,

Budowę napędu EEA-5 przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Budowa napędu zwrotnicowego typu EEA-5 [16]

Napędy typu EEA-5 wykonywane są w następujących podstawowych rodzajach [15]:

EEA-51 - bez wewnętrznych zamknięć nastawczych, nierozpruwalny, przewidziany do zwrotnic z zamknięciami nastawczymi.

EEA-53 - bez wewnętrznych zamknięć nastawczych, rozpruwalny, przewidziany do zwrotnic z zamknięciami nastawczymi.

Ogólne dane techniczne i warunki pracy dla napędu EEA-5 [15]:

- Skok suwaka nastawczego: 125 ± 3 , 140 ± 3 , 181 ± 3 , 204 ± 3 , 220 ± 3 mm;
- Siła nastawcza:
 - Nierozpruwalny: 6^{+1} kN;

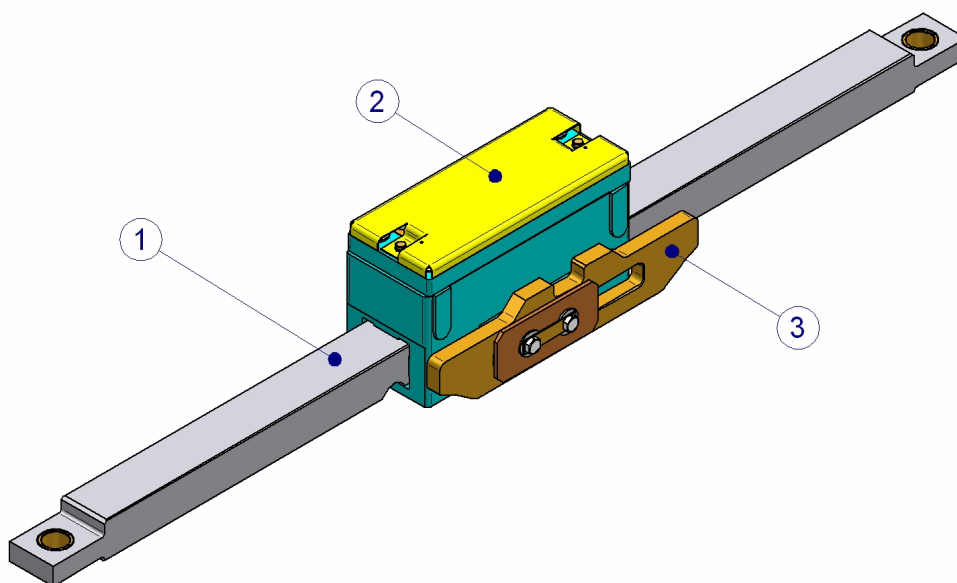
- Rozpruwalny: $5,5^{+1}$ kN;
- Maksymalne opory przestawiania rozjazdu:
 - Nierozpruwalny: 5,2 kN;
 - Rozpruwalny: 5,0 kN;
- Siła trzymania napędu nierozpruwalnego: 100 ± 10 kN;
- Siła rozprucia napędu rozpruwalnego: $9,0 \div 12$ kN;
- Czas przestawiania: 5 ± 1 sek.;
- Masa: 160 kg.;
- Zakres temperatur pracy: od -40 do $+80^{\circ}\text{C}$;
- Stopień ochrony: IP 54;
- Trwałość: 1 mln zadziałań
- Odporność na udary: 30 g;
- Wymiary: 1123 x 412 x 274 mm;
- Oporność przewodów: do 54 Ω ;
- Napięcie zasilania: 3x400V 50Hz, 1x230V 50Hz;
- Moc silnika: 435 W;
- Prąd znamionowy (dla oporów zewn. ok. 6 kN): max. 2,5 A; max. 4,8 A;
- Prędkość obrotowa silnika: 1400 obr/min.;

Zasada działania napędu EEA-5:

Przestawienie napędu.

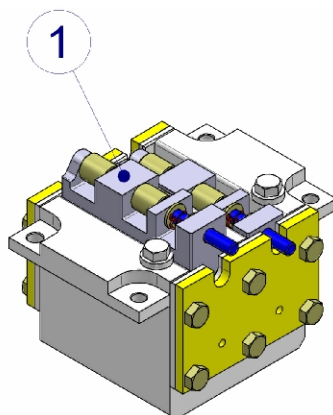
Silnik elektryczny poprzez koła zębate i sprzęgło przeciążeniowe obraca śrubę kulową. Nakrętka śruby kulowej przesuwana jest, która przesuwa sprzęgło siły trzymania wraz z suwakiem nastawczym. W skrajnych położeniach napędu, blokady trzymają sprzęgło siły trzymania z suwakiem nastawczym połączonym z drążkiem zamknięcia w rozjeździe. Moduł sterująco-kontrolny steruje prądem nastawczym (np. wyłącza silnik w skrajnych położeniach) oraz załącza sygnalizację kontroli położenia iglic rozjazdu. Moduł korby wyłącza napięcie silnika po włożeniu na wałek silnika korby do ręcznego przestawiania napędu. W przypadku braku połączenia suwaka nastawczego z drążkiem zamknięcia suwaki kontrolne napędu poprzez pręty kontrolne blokują w skrajnych położeniach iglice dolegającą.

W nierozpruwalnym napędzie EEA-5 suwak nastawczy poz.1 jest na trwale połączony z korpusem sprzęgła siły trzymania poz.2. Suwak nastawczy z korpusem sprzęgła siły trzymania tworzy sprzęgło siły trzymania – rys. 11. W napędzie rozpruwalnym suwak nastawczy jest połączony ze sprzęgłem za pomocą pakietu sprężyn płaskich.



Rys. 11. Sprzęgło siły trzymani napędu EEA-5

W skrajnych położeniach sprzęgło siły trzymania jest blokowane przez wysuniętą za pomocą sprężyn, blokadę poz.1 modułu zamykającego – rys.12. Blokady te poprzez mechanizm krzywkowy przełączają wyłączniki krańcowe modułu sterująco-kontrolnego, dające sygnał kontrolny do systemu sterowania.



Rys. 12. Moduł zamykający napędu EEA-5.

Działanie modułu zamykającego oraz suwaka nastawczego podczas przestawiania napędu w przeciwne skrajne położenie pokazano schematycznie na rys. 13. W czasie przestawiania wyróżnić można 4 podstawowe fazy:

Faza 1

Napęd znajduje się w skrajnym położeniu. Blokada wysunięta blokuje możliwość przesunięcia suwaka nastawczego i korpusu.

Faza 2

Za pomocą liniału (poz.3 rys. 12) blokada modułu zamykającego zostaje wciśnięta i następuje odblokowanie suwaka nastawczego napędu.

W tym momencie zostają przełączone wyłączniki krańcowe modułu sterującego-kontrolnego i zostaje przekazany sygnał utraty kontroli do systemu sterującego. Szczegóły pokazano na rysunku 14.

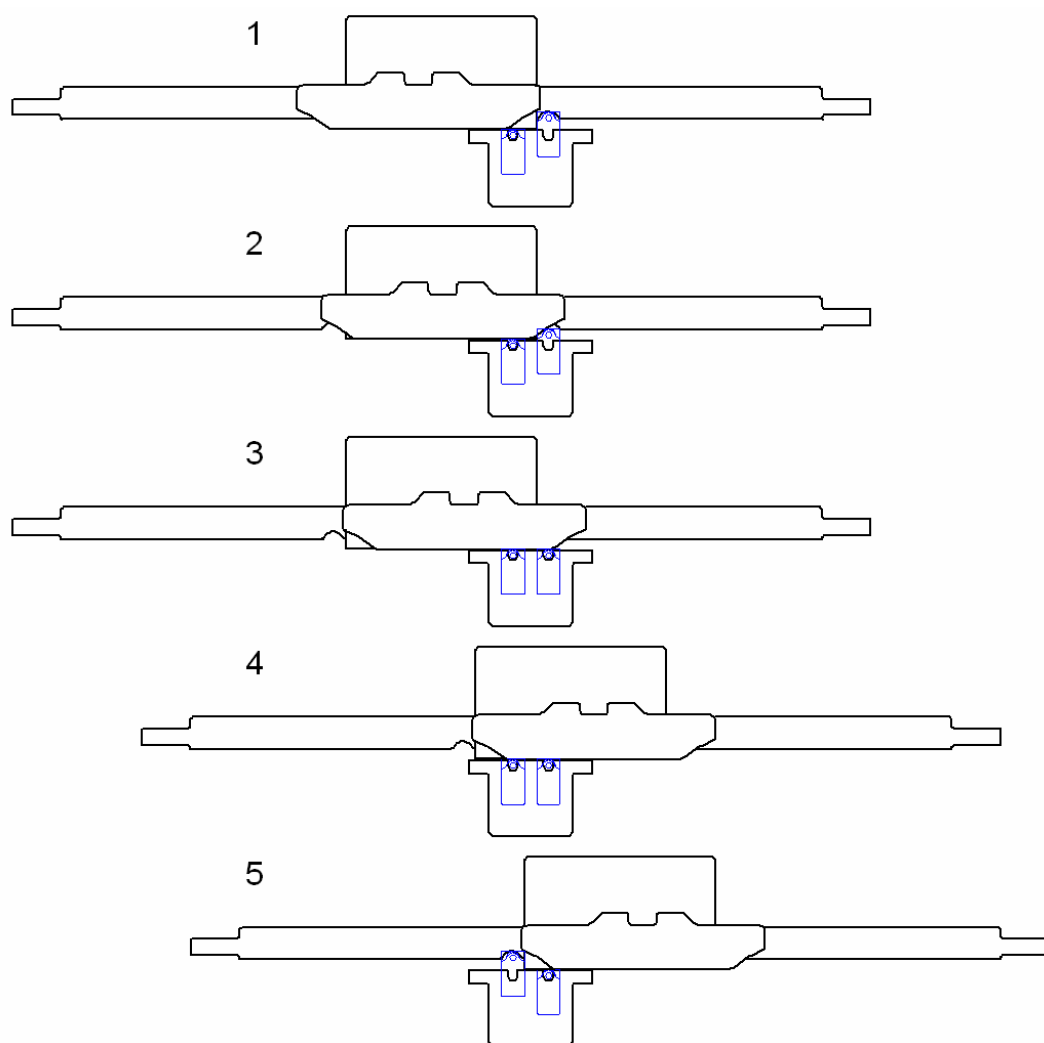
Faza 3

Następuje przestawianie suwaka nastawczego napędu. Obie blokady są wciśnięte do modułu zamykającego.

Faza 4

Po przestawieniu suwaka z korpusem druga blokada może wysunąć się, blokując tym samym suwak wraz z korpusem w przeciwnym położeniu. Aby wysunięta blokada zajęła prawidłowe położenie musi wejść w wycięcia suwaka nastawczego i suwaków kontrolnych, co potwierdza prawidłowe położenie zamknięcia rozjazdu i iglic. Szczegóły pokazano na rysunku 15.

Gdy blokada jest w prawidłowym górnym położeniu następuje przełączenie wyłączników i zostaje przekazany sygnał prawidłowej kontroli do systemu sterującego.



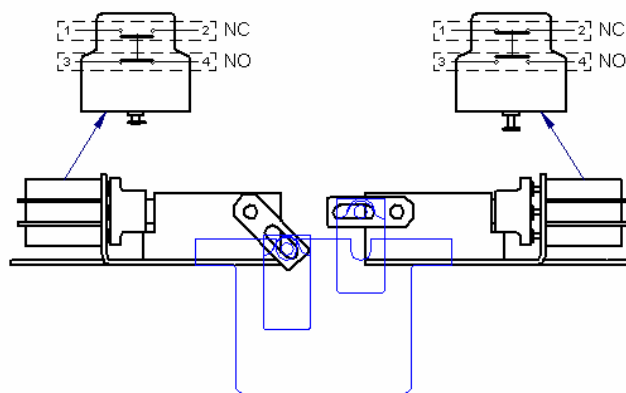
Rys. 13. Fazy przestawiania napędu EEA-5.

Układ kontroli napędu EEA-5

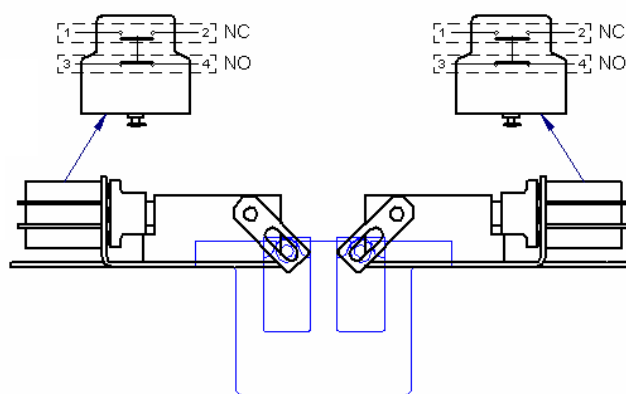
Informację o tym, w jakim położeniu znajduje się napęd EEA-5 przekazuje do systemu nadrzędnego moduł sterująco-kontrolny (lewy i prawy).

Moduł sterująco-kontrolny jest bezpośrednio połączony z blokadą i w zależności od położenia blokady, wyłączniki krańcowe zajmują odpowiednie położenie. Na rys. 14 pokazano położenie styków modułu sterująco-kontrolny dla obu skrajnych położań napędu i położenia pośredniego. Na rysunku zaznaczono, jakim fazom ruchu 1÷4, pokazanym na rys. 13, odpowiada położenie styków.

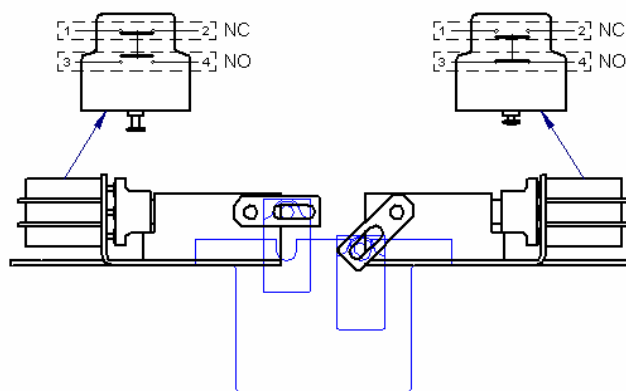
Faza 1 – położenie skrajne napędu



Fazy 2 i 3 - położenie pośrednie napędu



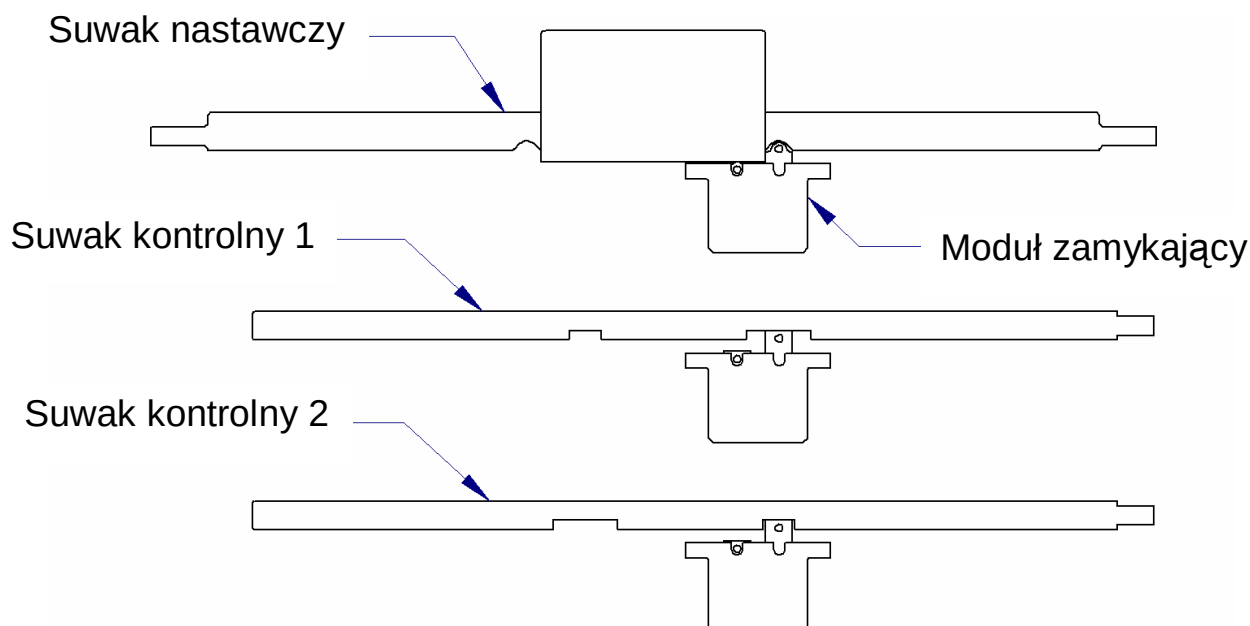
Faza 4 – położenie skrajne napędu



Rys. 14. Położenie styków modułu sterująco-kontrolny w fazach przestawiania

W skrajnych położeniach napędu EEA-5, czyli dla faz ruchu 1 i 4, jedna blokada jest wysunięta a druga wsunięta. Aby wysunięta blokada zajęła prawidłowe położenie musi wejść w wycięcia suwaka nastawczego i suwaków kontrolnych, co potwierdza prawidłowe położenie zamknięcia rozjazdu i iglic. Prawidłowe położenie wysuniętej blokady w rowkach suwaków pokazano na rys. 15. Suwaki kontrolne napędu w skrajnych położeniach w przypadku awarii suwaka nastawczego lub pręta nastawczego blokują iglice rozjazdu z siłą ok. 25kN.

Dokładność kontroli położenia iglicy dolegającej poprzez suwaki kontrolne ustawiana standardowo jest tak, aby przy szczelinie 2mm kontrola była prawidłowa a przy szczelinie 4mm uzyskać brak kontroli położenia.



Rys. 15. Położenie blokad w rowkach suwaków kontrolnych napędu

Działanie napędu podczas rozprucia rozjazdu

Napęd rozpruwalny

Najeżdżenie taborem o prędkości do 40 km/h z ostrza na niewłaściwie ustawiony rozjazd z napędem rozpruwalnym powoduje rozprucie rozjazdu, a napęd rozpruwalny przekazuje informacje o rozpruciu do obwodu kontrolnego.

W położeniu krańcowym blokada przytrzymuje suwak nastawczy poprzez sprzęgło siły trzymania. Rozprucie napędu rozpruwanego następuje po zadziałaniu na suwak nastawczy siły przekraczającej ustaloną wartość siły rozprucia. Podczas rozpruwania napędu następuje przesunięcie suwaka nastawczego względem korpusu sprzęgła siły trzymania unieruchomionego blokadą. Wysunięcie suwaka nastawczego powoduje wyjście wałka z wycięcia w suwaku, co powoduje ugięcie pakietu sprężyn płaskich ustalających siłę trzymania. Równocześnie drugie wycięcie w suwaku nastawczym przesuwają blokadę w dół. Przesunięcie blokady powoduje uruchomienie

wyłącznika krańcowego w module, sterująco-kontrolnym, który przerywa swym stykiem obwód kontrolny napędu dając sygnalizację rozprucia. Blokada przesunięta w dół nadal trzyma korpus sprzęgła siły trzymania jednak wychodzi z wycięć suwaków kontrolnych. Dalsze przesuwanie suwaka zamknięcia nastawczego i suwaka nastawczego napędu powoduje uchylenie zamknięcia nastawczego.

Napęd nierozpruwalny

W napędzie nierozpruwalnym sprzęgło siły trzymania jest sztywno połączone z suwakiem nastawczym, co zapewnia trzymanie napędu do siły 100kN. Większa siła może spowodować uszkodzenie lub zniszczenie napędu nierozpruwalnego. Rozprucie rozjazdu z napędem w wersji nierozpruwalnej powoduje konieczność bezwarunkowej wymiany napędu na nowy.

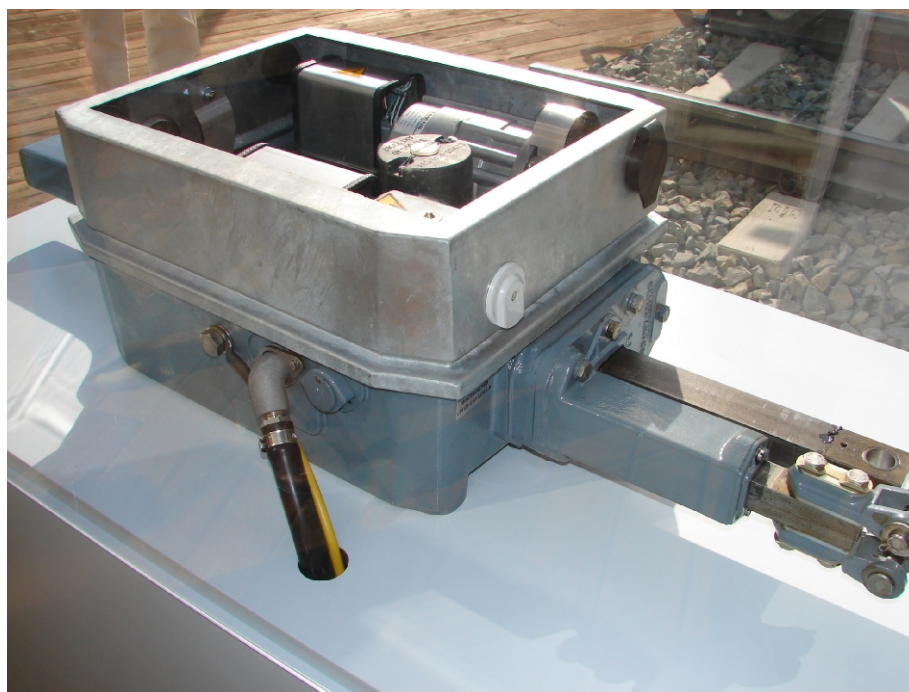
Charakterystyczne cechy napędu EEA-5:

- Czas przestawiania: 4,0 lub 5,0 sek,
- rozpruwalne (o sile trzymania 7,5 kN) i nierozpruwalne (o sile trzymania 100 kN) nie umożliwiające wykrycia rozprucia bez przestawienia napędu lub dodatkowego kontrolera
- bez suwaków kontrolnych lub z suwakami, pozwalającymi na potwierdzenie zakończenia procesu przestawiania a w przypadku uszkodzenia pręta nastawczego lub zamknięcia zewnętrznego na dodatkowe trzymanie iglic z siłą min. 25 kN
- przewidziane do współpracy z zewnętrznymi zamknięciami nastawczymi, przestawiania zwrotnic, ruchomych dziobów krzyżownic oraz wykolejnic,
- o różnych napięciach silników elektrycznych pozwalających na dopasowanie do warunków zasilania (230VAC, 3x400V AC)
- o okablowaniach 4-7 żyłowych dla wszystkich rodzajów układów sterująco-kontrolnych stosowanych na PKP
- waga napędu około 160 kg

Napędy te przystosowane są do zabudowy prostopadle do toru na umocowaniach przytwierdzonych do sąsiednich podkładów drewnianych lub betonowych lub mogą być mocowane na podrozejzdnicach korytowych. Napędy tego typu mogą być stosowane w rozjazdach dużych prędkości z wielopunktowym trzymaniem.

2.2.1.3 Napęd zwrotnicowy typu S700K

Napęd zwrotnicowy typu S700K jest produkowany w wielu wersjach i odmianach od roku 1983 w Niemczech. W Polsce zainstalowanych jest ok. 200 szt tego typu napędów. Napęd ten jest konstrukcją i zasadą działania zbliżony do napędu EEA-5. Napęd S700K przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Napęd zwrotnicowy S700K.

Dane techniczne napędu zwrotnicowego S 700 K [17],[85]

Rodzaj zasilania	AC 400 V, 50 Hz (trójfazowy) AC 230 V, 50 Hz (jednofazowy) AC 110 V, 50 Hz (jednofazowy) DC 110 V lub DC 220 V
Siła nastawcza	$5,5 \pm 0,5$ kN
Siła trzymania	7 kN

Maksymalna siła wsteczna iglicy odlegającej (sprężystość)	1,4 kN
Odległość nastawcza (przy zastosowaniu kabli miedzianych)	≤1900 m przy przekroju żył 0,9 mm ≤4640 m przy przekroju żył 1,4 mm ≤7680 m przy przekroju żył 1,8 mm
Skok nastawczy	150 mm, 220 mm, 260 mm
Czas przestawiania przy skoku 150mm	≤5 s
Czas przestawiania dla skoku 220 mm	≤6 s
Prąd roboczy	≤2 A
Prąd rozruchu	≤8 A
Dopuszczalna rezystancja żył	≤54 Ω
Masa	ok.120 kg
Zakres temperatur	-40°C do +70°C

Charakterystyczne cechy napędu:

- wolnobieżne o szybkości działania do 6 s dla skoku 220mm; w ofercie także skoki 150mm i 260mm, inne na zamówienie; istnieje możliwość zamówienia napędów o różnych skokach i porównywalnym czasie przestawiania,
- rozpruwalne (o sile trzymania 7 kN) i nierozpruwalne (o sile trzymania 25 kN) nie umożliwiające wykrycia rozprucia bez przestawienia napędu lub dodatkowego kontrolera
- przewidziane do współpracy z zewnętrznymi zamknięciami nastawczymi, przestawiania zwrotnic i ruchomych dziobów krzyżownic oraz wykolejnic
- umożliwiają wykorzystanie w układach wielonapędowych;
- przystosowane do współpracy ze sprzężeniami zamknięć nastawczych
- bez suwaków kontrolnych lub z suwakami, pozwalającymi na potwierdzenie zakończenia procesu przestawiania a w przypadku uszkodzenia pręta nastawczego lub zamknięcia zewnętrznego na dodatkowe trzymanie iglic z siłą min. 25 kN
- o różnych napięciach silników elektrycznych pozwalających na dopasowanie do warunków zasilania
- o okablowaniach 4-7 żyłowych dla wielu rodzajów układów sterująco-kontrolnych stosowanych na PKP
- włożenie korby ręcznej możliwe po użyciu specjalnego klucza blokującego zasilanie
- waga napędu około 120 kg

Napędy te przystosowane są do zabudowy prostopadle do toru na umocowaniach przytwierdzonych do sąsiednich podkładów drewnianych lub betonowych lub mogą być mocowane na podroziejzdnicach korytowych. Napędy tego typu mogą być stosowane w rozjazdach z dużych prędkości z wielopunktowym trzymaniem.

Napęd ten posiada odmianę zintegrowaną z podroziejzdnicą o oznaczeniu S700KM.

Podsumowanie

Przedstawione powyżej napędy są tradycyjne a konstrukcje ich mają podobne cechy, zwłaszcza napędy EEA-5 i S700K. Odpowiednie odmiany tych napędów mają bardzo zbliżone parametry techniczne i takie same napięcia zasilania. Napędy w wersjach bez zamknięć nastawczych spełniają te same funkcje, co umożliwi najprawdopodobniej, do monitorowania ich stanu wykorzystanie tego samego systemu. Najwięcej, w chwili obecnej, na sieci jest zainstalowanych napędów starszej generacji EEA-4. Jednak aktualnie, przy inwestycjach w infrastrukturę instaluje się prawie wyłącznie napędy nowego typu, które w przyszłości zastąpią poprzedników. Dlatego też przyjęto, że dla napędu EEA-5 będzie formułowana procedura diagnozowania oraz budowany system monitorowania.

2.2.2 Inne napędy zwrotnicowe stosowane na świecie

2.2.2.1 Napęd EBI Switch 2000

EBI Switch 2000 jest nierozpruwalnym napędem zwrotnicowym zintegrowanym z zamknięciem nastawczym i podrozjazdnicą. Napęd ten został zaprojektowany tak, aby zapewnić optymalną integrację z torem [56]:

- W rozjeździe zastępuje standardowy podkład (podrozjazdnicę);
- Umożliwia sprawne, mechaniczne prowadzenie prac utrzymaniowych (zagęszczanie i ubijanie tłucznia, uzupełnianie tłucznia oraz usuwanie śniegu)
- Zaprojektowany do układów jednonapędowych, wielonapędowych oraz ruchomego dzioba krzyżownicy
- Parametry: czas przestawiania, skok, siła nastawcza oraz opóźnienie czasowe rozpoczęcia procesu przestawiania są regulowane. Przez co zapewnia synchronizację przestawiania i może być zastosowany bez adaptacji w dowolnym miejscu rozjazdu.

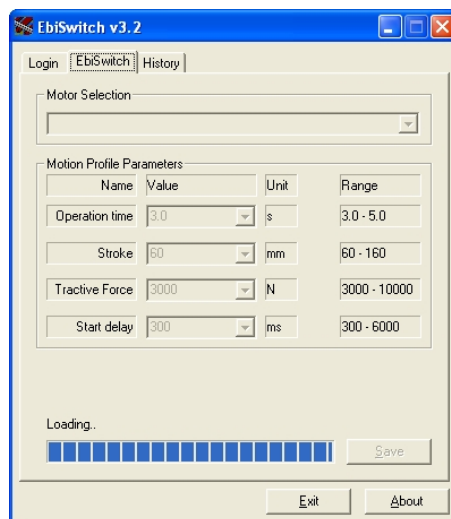


Rys. 17. Zabudowany EBI Switch 2000 z usuniętą pokrywą. [84]

Parametry programowane w napędzie:

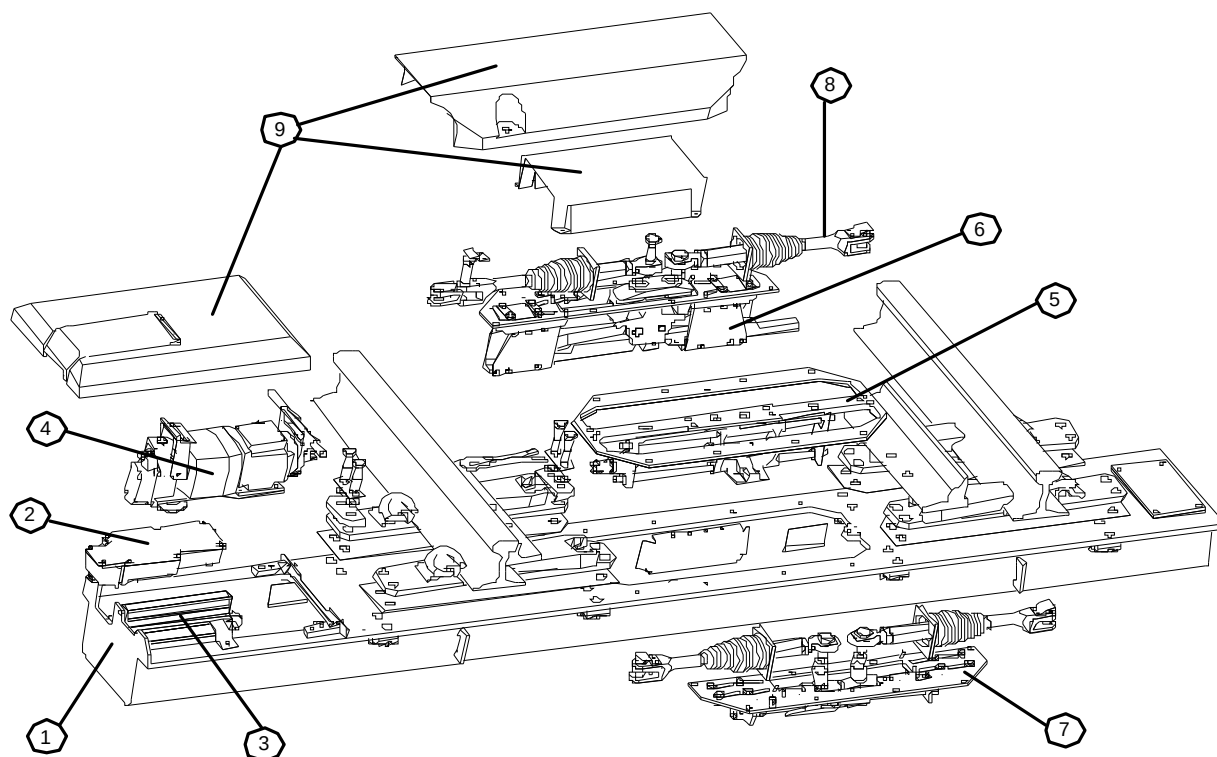
§ Skok	20 - 160 mm
§ Czas przestawiania	3 – 5 s
§ Siła nastawcza	3 – 10 kN
§ Opóźnienie startu	300 - 6000 ms

Parametry te mogą być przeprogramowane w terenie.



Rys. 18. Ekran programu do przeprogramowania parametrów napędu EBI Switch 2000 [56].

Siła nastawcza jest regulowana i kontrolowana elektrycznie, dzięki temu nie ma mechanicznego sprzęgła, które wymaga serwisowania. Przetwornica częstotliwości jest wyposażona w diodowe wskaźniki, które wyświetlają kody błędów w sytuacji, kiedy wystąpią usterki w zakresie przestawiania.

Budowa napędu *EBI Switch 2000*Rys. 19. Moduły napędu zwrotnicowego *EBI Switch 2000* [56]

1. Skrzynia napędu	4. Moduł silnika	7. Moduł kontrolny
2. Skrzynka przyłączeniowa	5. Zespół napędowy	8. Pręty łączące
3. Przetwornica częstotliwości	6. Moduł zamykający i nastawczy	9. Pokrywy ochronne

Opis modułów

1. **Skrzynia napędu** jest zaprojektowana w formie stalowego podkładu w formie rynny, w którym umieszczone są moduły. Stanowi on osłonę dla modułów i dodatkowo pełni podstawową rolę podkładu, czyli podtrzymuje i łączy tor kolejowy.
2. **W skrzynce przyłączeniowej** są dwa wloty kablowe na kable wychodzące z systemu zależnościowego. Zewnętrzne kable są podłączone do listwy

zaciskowej. Wszystkie kable wewnętrzne są podłączone za pomocą złączy kablowych.

3. **Przetwornica częstotliwości** kontroluje prędkość silnika i siłę nastawczą przez zdefiniowany czas przestawiania. Dzięki temu, że siła nastawcza jest regulowana i kontrolowana elektrycznie nie ma mechanicznego sprzęgła, które wymaga serwisowania. Przetwornica częstotliwości jest wyposażona w diodowe wskaźniki, które wyświetlają kody błędów w sytuacji, kiedy wystąpią usterki w zakresie przestawiania.
4. Na **moduł silnika** składa się niewymagający konserwacji asynchroniczny silnik z hamulcem, jednostopniowa przekładnia, moduł korby oraz wyłącznik korby.
5. **Zespół napędowy** obejmuje śrubę z nakrętką kulową, która przetwarza obrót i moment obrotowy wału silnika w ruch liniowy.
6. **Moduł zamykający i nastawczy** zapewnia bezpieczne zaryglowanie, które jest kontrolowane przez dwa mikroprzełączniki. Na moduł składa się pakiet sprężyn, który w położeniu krańcowym dociska iglicę do opornicy. Wymagany skok jest regulowany w sposób ciągły w zależności od potrzeb dla różnych położań w rozjeździe.
7. **Moduł kontrolny** kontroluje położenia zarówno iglicy dolegającej, jak i odlegającej. Obwód kontrolny obejmuje cztery szeregowo połączone mikroprzełączniki – dwa w module zamykającym i dwa w module kontrolnym.
8. **Pręty łączące** połączone z modulem zamykającym są wyposażone w mechanizm zwalnający w celu ograniczenia zniszczeń na wypadek rozprucia. Pręty są krótkie, dzięki czemu iglice są pewnie trzymane w położeniu krańcowym.
9. **Pokrywy ochronne** są umieszczone nad silnikiem i nad modulem nastawczym i kontrolnym w skrzyni napędu. Chronią one pręty łączące przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz dostępem śniegu, wody, kurzu i piasku itd.

Modułowa struktura umożliwia szybką wymianę modułów w razie takiej konieczności. Moduły są umieszczone w wytrzymałej skrzyni napędu, która chroni je przed

wpływem środowiska zewnętrznego. Moduły są regulowane w zakresie skoku napędu, co pozwala na zmniejszenie zapasów części zamiennych i upraszcza logistykę.

Dane techniczne napędu [56]:

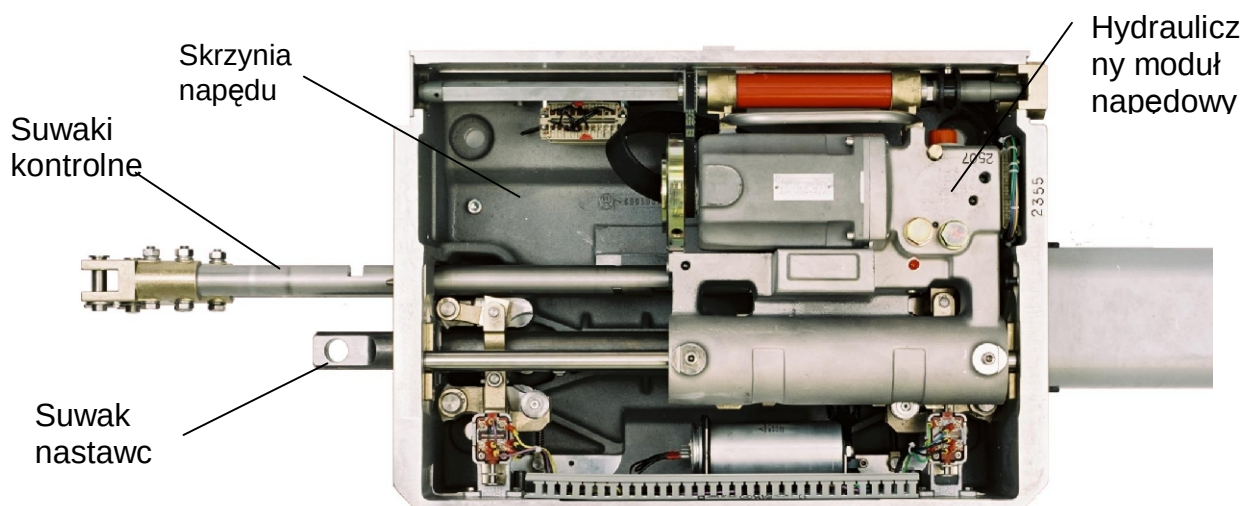
Odmiana	Napięcie zasilania	Skok
Standardowy	115V _{AC} /(136V _{DC}) 230V _{AC}	60-160mm z mechanizmem zatraskowym lub bez niego
Do ruchomego dzioba krzyżownicy	115V _{AC} /(136V _{DC}) 230V _{AC}	20-120mm

	Standardowy	Ruchomy dziób krzyżownicy
Wymiary podkładu: długość x szerokość Wysokość / wysokość z pokrywami	3000 x 400 mm 200 / 400 mm	4450 x 400 mm 200 / 400 mm
Waga	~600 kg	~900 kg
Siła trzymania	100 kN	
Docisk iglicy do opornicy	2,5kN, przy 3 mm ugięcia sprężyny	
Szerokość toru	1435 mm	
Maksymalne obciążenie osi pociągu (przy współczynniku bezpieczeństwa 2)	32 000 kg	
Tolerancja przesunięcia szyny (podłużnego)	+/-34 mm	

2.2.2.2 Napęd EBI Switch 700

Napęd ten jest elektrohydraulicznym napędem, w którym siła nastawcza osiągana jest poprzez napędowy moduł hydrauliczny, a ciśnienie w systemie hydraulicznym występuje tylko podczas operacji przestawiania. Siła trzymania osiągana jest na drodze mechanicznej bez udziału układu hydraulicznego i jest ustawiana niezależnie od siły nastawczej z zachowaniem bezwzględnej zależności, że siła trzymania jest zdecydowanie większa od siły nastawczej. Dla napędów rozpruwalnych siła

trzymania jest równoznaczna z siłą rozprucia. Wartości parametrów siły nastawczej i rozprucia są sprawdzane fabrycznie, a odpowiadające im elementy są zaplombowane. Wszystkie elementy napędu zwrotnicowego są wykonane z materiałów odpornych na korozję.



Rys. 20. Napęd EBI Switch 700 - Widok napędu od góry ze zdjętą pokrywą [12]

Elektrohydrauliczny moduł napędowy składa się z silnika elektrycznego, osiowej pompy tłokowej, bloku sterującego zawierającego układ hydrauliczny wraz z zaworami i dwukierunkowym cylindrem hydraulicznym z przelotowym tłoczyskiem. Zespół napędowy jest skonstruowany jako zamknięta całość, bez przewodów hydraulicznych bądź też innych połączeń skręcanych. Ilość oleju jest bardzo mała, około 0,9l, co jest spowodowane zwartą konstrukcją. Do korpusu modułu napędowego zabudowany jest zespół ręcznego przestawiania wraz z wrzecionem napędowym dla ręcznej korby. Dzięki zwartej modułowej konstrukcji moduł napędowy może zostać z łatwością zabudowany bądź wymontowany w terenie za pomocą dwóch śrub imbusowych M8.

Dane techniczne napędu [12]:

Skok suwaka nastawczego:	- 150 ± 2 , 220 ± 2 mm
Siła trzymania (w zależności od wersji):	- $7,0^{+1}$ lub $9,0^{+1}$ kN, min. 100 kN
Siła rozprucia napędu rozpruwalnego:	- $7,0^{+1}$ lub $9,0^{+1}$ kN
Siła nastawcza:	- 5,0; 6,0; $7,0 \pm 0,5$ kN,

Napięcie zasilania:	- 3x400V, 1x230V 50Hz i 16,7Hz, 1x220V DC
Moc silnika:	- 550 W dla 1400 obr/min
Pobór prądu (znamionowy):	- max. 2,5A dla zasilania trójfazowego; max. 6A dla zasilania jednofazowego
Czas przestawiania (skok 220mm):	- $3^{+0,5}$ lub $5^{+0,5}$ sek.
(skok 150mm):	- $2^{+0,5}$ lub $4^{+0,5}$ sek.
Oporność przewodów z silnikiem 3-fazowym:	- 50Ω na przewód,
Temperatura otoczenia:	- od -40°C do $+80^{\circ}\text{C}$,

2.2.2.3 Napęd zwrotnicowy typu S700KM

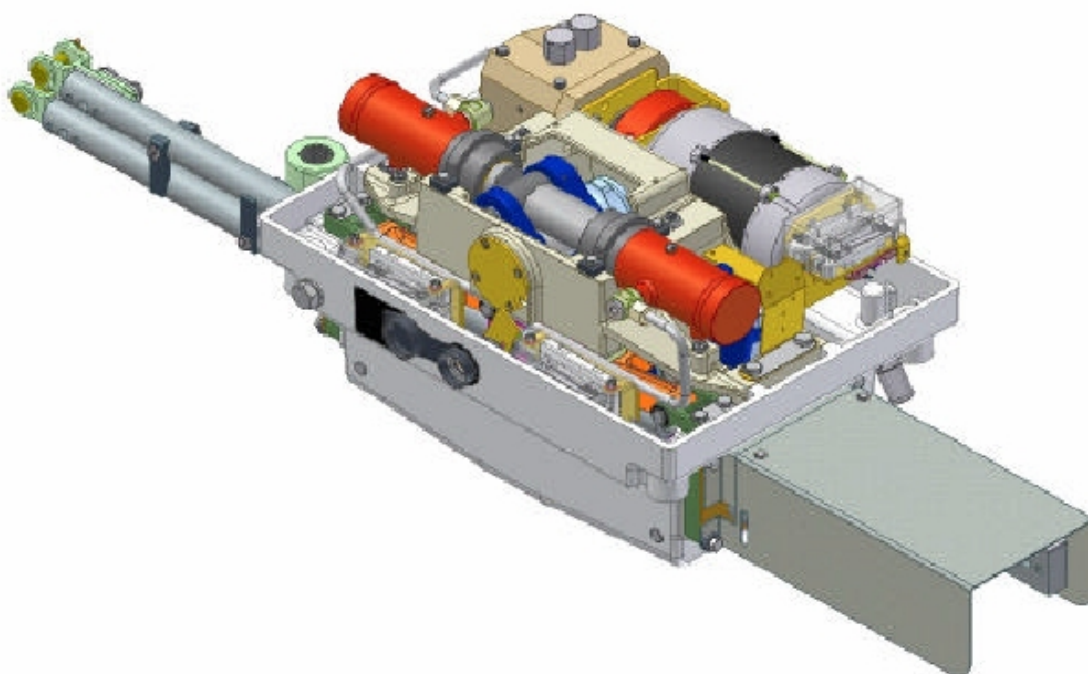


Rys. 21. Napęd zwrotnicowy typu S700KM [85]

Modułowy napęd zwrotnicowy typu S700KM jest zabudowany w podrozdźnicy skrzynkowej o szerokości zbliżonej do szerokości podrozdźnicy betonowej. Umożliwia to podbijanie rozjazdu za pomocą typowych podbijarek rozjazdowych. W obudowie o kształcie litery U zabudowane jest zamknięcie nastawcze oraz zmodyfikowany napęd zwrotnicowy S700K, który szerzej został opisany powyżej.

2.2.2.4 Napęd zwrotnicowy L826H

Napęd zwrotnicowy typu L826H przedstawiony na rysunku 22 jest produkowany w wielu wersjach i odmianach. Cechą szczególną tego rozwiązania jest to, iż instalacja tego napędu jest możliwa zarówno z boku toru, jaki pomiędzy tokami w podrozdźnicy stalowej. Skok suwaka nastawczego napędu jest regulowany a czas przestawiania jest niezależny od tego skoku. Zapewnia to synchronizację przestawiania i jest on stosowany w rozjazdach wielonapędowych.



Rys. 22. Napęd zwrotnicowy typu L826H [62]

Napędy zintegrowane mają inną konstrukcję w stosunku do stosowanych obecnie w Polsce. Posiadają na przykład wbudowane elektroniczne elementy

sterowania, przez co ich monitorowanie wymaga zupełnie innego systemu monitorowania i wnioskowania diagnostycznego.

2.3. Rozjazdy kolejowe

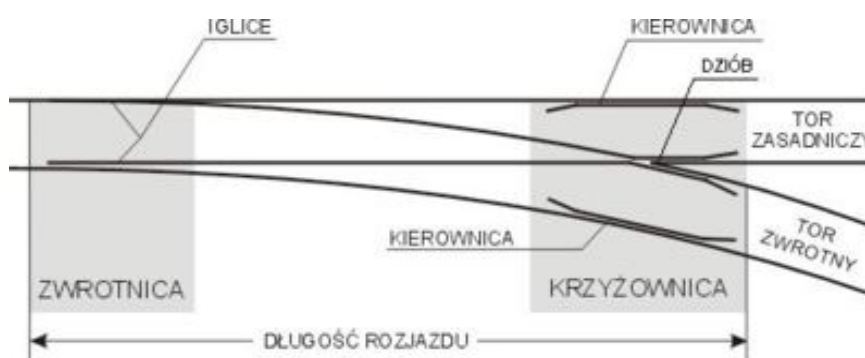
Rozjazd kolejowy jest to część toru kolejowego służąca do zmiany kierunku przejazdu pojazdu szynowego z toru zasadniczego na inny tor zwrotny (odgałęźny) lub odwrotnie.

W rozjazdach kolejowych zwyczajnych wyróżniamy następujące podstawowe zespoły i urządzenia:

- Zwrotnica z iglicami sprężystymi lub szynowo-sprężystymi,
- Krzyżownica z dziobnicą,
- Urządzenia kierownic,
- Suwakowe zamknięcie nastawcze zwrotnicy,

Opcjonalnie - Urządzenia stabilizujące położenie iglic oraz podrozdajnica zespolona lub koryto ochronne do zamknięcia nastawczego zwrotnicy.

Schematyczną budowę rozjazdu zwyczajnego pokazano na rysunku 23 [59].



Rys. 23. Budowa rozjazdu kolejowego

Na liniach kolejowych stosuje się różne typy rozjazdów, w zależności od typu szyny, promienia łuku toru zwrotnego (długość) i skosu (odchylenie).

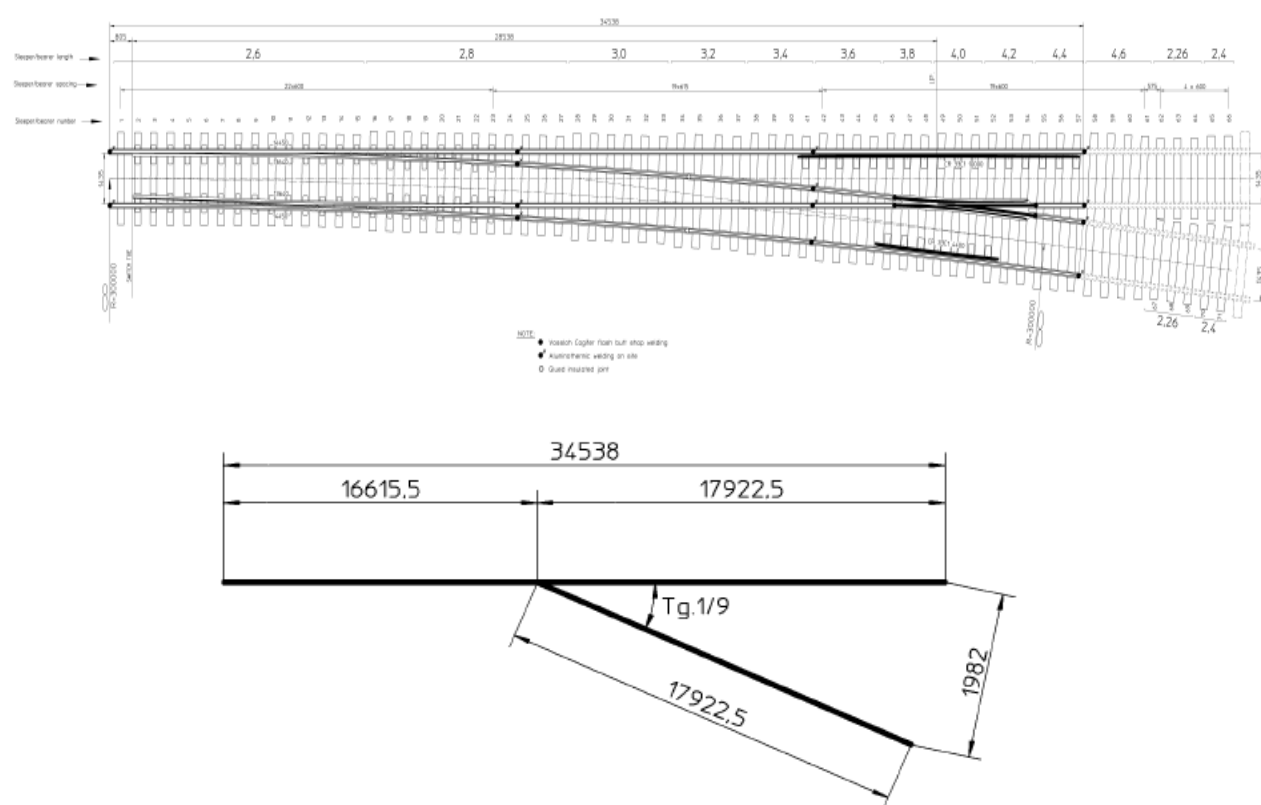
Promień łuku toru zwrotnego (R) występuje w rozmiarach od 190 m do 1200 m (dla toru normalnego 1435 mm) i większych dla dużych prędkości powyżej 200 km/h.

W Polsce przy jeździe na tor zwrotny lub z toru zwrotnego rozjazdu obowiązują następujące ograniczenia prędkości:

100 km/h przy $R=1200$ m,

60 km/h przy $R=500$ m,
40 km/h przy mniejszym promieniu.

W Polsce instaluje się najczęściej rozjazdy zwyczajne o następujących parametrach:
 $R=190$ m skos 1:9, $R=300$ m skos 1:9, $R=500$ m skos 1:12, $R=1200$ m skos 1:18,5.
Ponadto stosuje się rozjazdy krzyżowe i łukowe.
Przykładowy, szczegółowy plan rozjazdu o promieniu $R300$ i skosie 1:9 pokazano na rysunku 24.

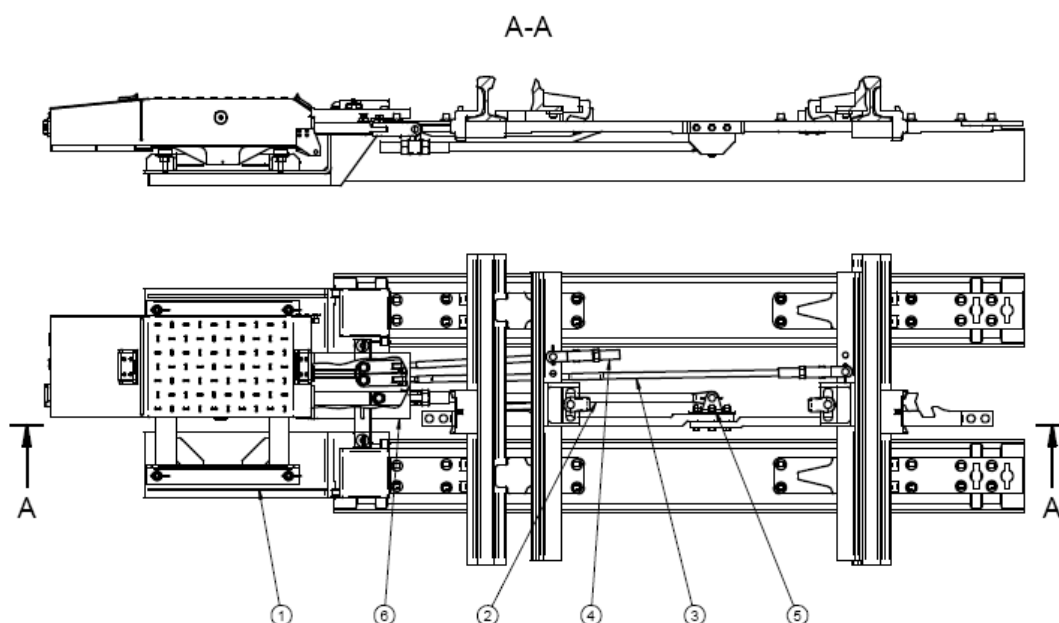


Rys. 24. Plan rozjazdu zwyczajnego $R300$ skos 1:9 [11].

Do przestawiania zwrotnic kolejowych stosuje się napędy zwrotnicowe. Typową zabudowę konwencjonalnego napędu zwrotnicowego do zwrotnicy pokazano na rysunku 25 i 26. Napęd usytuowany jest z boku toru na ramie (1) umieszczonej na stalowych pasach przykręconych do dwóch sąsiednich podrozjazdnic. Suwak nastawczy napędu za pomocą pręta nastawczego (2) jest połączony z drążkiem zamknięcia nastawczego. Natomiast suwaki kontrolne napędu są połączone bezpośrednio do iglic zwrotnicy z pomocą prętów (3) i (4).



Rys. 25. Napęd zwrotnicowy zabudowany przy rozjeździe.



Rys. 26. Plan zabudowy napędu zwrotnicowego do zwrotnicy.

W takim rozwiązaniu, w skrajnym położeniu zwrotnicy iglica dolegająca jest trzymana poprzez mechanizm zamknięcia nastawczego zwrotnicy (rys. 28) natomiast iglicę odlegającą poprzez suwak zamknięcia nastawczego trzyma napęd zwrotnicowy. Na rysunku 27 przedstawiono wykres zależności przesunięcia iglic w zależności od przesuwu pręta nastawczego napędu zwrotnicowego. Na jego podstawie możemy proces przestawiania zwrotnicy z suwakowym zamknięciem nastawczym podzielić na następujące fazy:

Faza I

W tej fazie odbywa się przemieszczanie iglicy odlegającej (2) oraz otwarcie zamka iglicy dolegającej (1); $0 \div 65$ mm przemieszczenia suwaka nastawczego napędu

Faza II

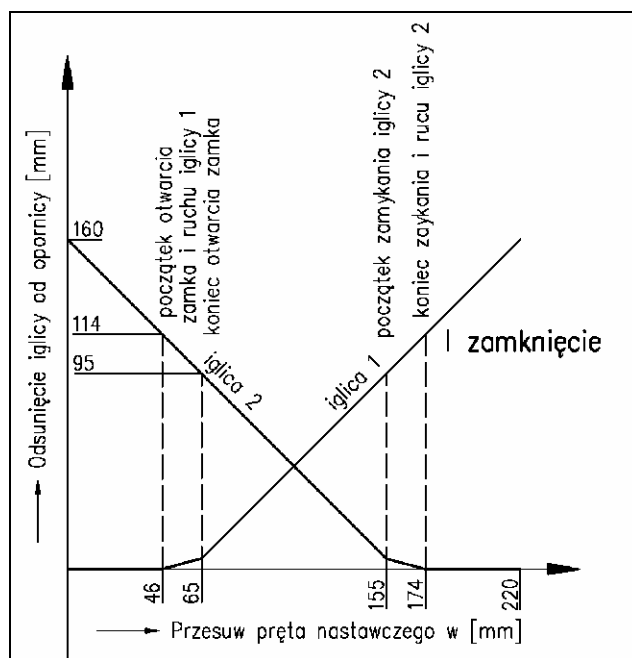
Obie iglice się przemieszczają, iglica (2) kończy przestawianie; $65 \div 155$ mm przemieszczenia suwaka nastawczego napędu

Faza III

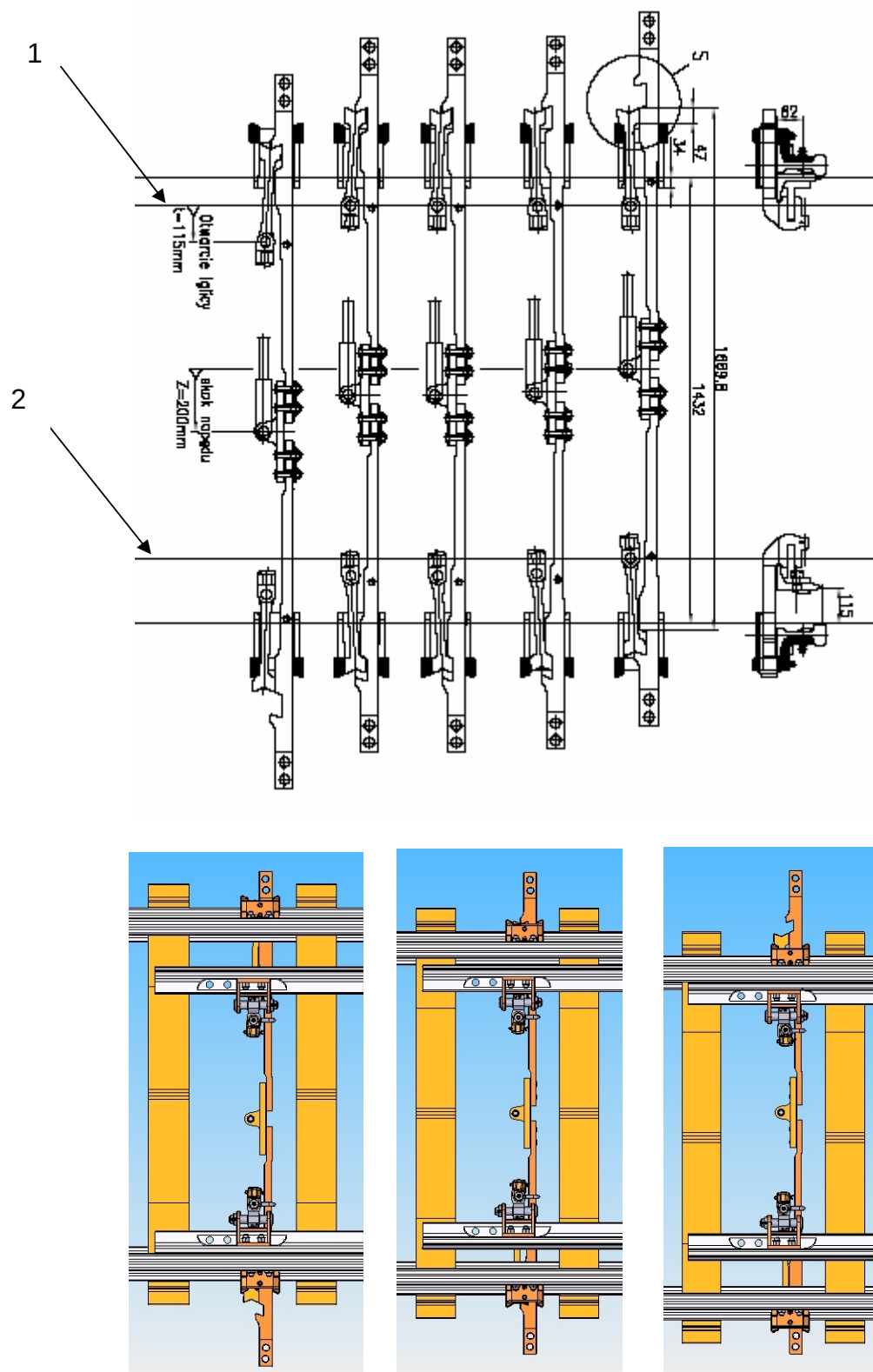
Zamknięcie zamka suwakowego przy iglicy (2), iglica (1) kończy przestawianie. Zakończenie całego przestawiania; $155 \div 220$ mm przemieszczenia suwaka nastawczego napędu.

Iglica (1), tak jak pokazano na rysunku 28, staje się dolegającą do opornicy, a iglica (2) odlegającą.

Na rysunku 28 przedstawiono działanie suwakowego zamknięcia nastawczego podczas procesu przestawiania.



Rys. 27. Wykres pracy zamknięcia zwrotnicy



Rys. 28. Schemat działania suwakowego zamknięcia nastawczego.

Podsumowanie

Ponieważ napęd zwrotnicowy zawsze współpracuje ze zwrotnicą, przestawia i utrzymuje ją w skrajnych położeniach, to dla opracowania systemu monitorowania i diagnostyki stanu technicznego wydaje się najkorzystniejsze rozpatrywanie całego układu napęd-zwrotnica, obejmującego napęd zwrotnicowy wraz ze zwrotnicą i zamknięciem nastawczym. Zarówno proces przestawiania napędu jak i zwrotnicy z suwakowym zamknięciem nastawczym można podzielić na fazy przestawiania, co może ułatwić opracowanie systemu diagnozowania stanu technicznego tych urządzeń.

3. Badania awaryjności i serwisu układów napęd-zwrotnica

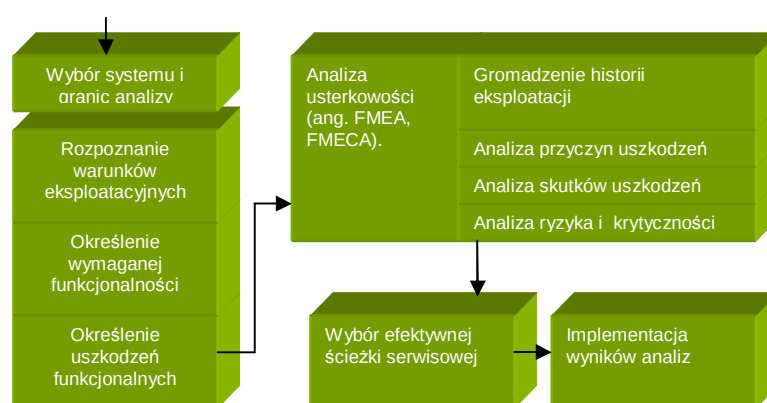
W obecnym czasie coraz powszechniej stosowaną metodyką zarządzania utrzymaniem i serwisem jest Reliability Centered Maintenance (Utrzymanie ukierunkowane na niezawodność) [70],[49],[51],[55],[79],[68]. Jest to rodzaj analizy wymagań dotyczących utrzymania i serwisowania obiektów z punktu widzenia osiągnięcia zakładanej niezawodności. Wykorzystanie metodyki RCM wiąże się z dokonaniem szczegółowej analizy funkcjonalnej obiektu a wyniki tej analizy mogą być z powodzeniem wykorzystane do przygotowania systemów informatycznych wspierających tworzenie diagnostycznej baz wiedzy. Metodę tą zastosowano do analizy usterkowości napędu zwrotnicowego typu EEA-5.

3.1.1 Metodyka Reliability Centered Maintenance

Na przestrzeni lat sposób eksploatacji urządzeń ulegał ciągłym zmianom. Pierwsze urządzenia produkcyjne ze względu na prostą konstrukcję mechaniczną oraz bardzo skromne środki techniczne podlegały jedynie bieżącej konserwacji oraz naprawie, gdy nastąpiło uszkodzenie. Sytuacja ta uległa zmianie i wraz z rozwojem przemysłu. Rozpoczęto opracowywać strategie serwisowe w oparciu o system planowych, zapobiegawczych remontów oraz wymiany podzespołów (ang. Preventive Maintenance) [42], mające na celu zapewnienie wymaganej bezawaryjności urządzeń. Rozwiązanie takie pozwalało uzyskać większą niezawodność przy znacznym ograniczeniu kosztów i czasów przestojów. Jednak z rozwiązaniem takim wiążą się również wady. Po pierwsze określenie czasów planowych wymian i remontów ma sens jedynie wtedy, gdy znamy przebieg krzywej zużycia danego elementu oraz gdy charakterystyka ta zawiera wyraźny punkt wzrostu prawdopodobieństwa uszkodzenia. Po drugie, aby zapewnić niezawodność należy uwzględnić wpływ specyficznych warunków eksploatacji, które mogą wystąpić u konkretnego użytkownika. W przypadku drogich i odpowiedzialnych obiektów lub urządzeń, uszkodzenie lub awaria może wiązać się z poważnymi konsekwencjami związanymi z bezpieczeństwem eksploatacji oraz kosztami. Z tego powodu koniecznym staje się aktywne zarządzanie procesem eksploatacji. Rozumie się przez to taką realizację eksploatacji, aby unikać nieprzewidzianych awarii.

Zwiększanie niezawodności systemu jest najczęściej procesem wieloetapowym a jednym z jego elementów jest właściwe serwisowanie urządzeń. Przemysł lotniczy był pierwszą gałęzią przemysłu, która zwiększała niezawodność poprzez techniki nazwane obecnie RCM. Metoda ta ciągiem analiz wykorzystywana do określenia wymagań serwisowych dowolnego urządzenia, w warunkach jego pracy (eksploatacji) zapewniających ciągłą realizację szeroko rozumianych oczekiwań użytkownika [78]. Istotne jest to, iż metodyka RCM formułuje cele eksploatacyjne na poziomie funkcji a nie na poziomie elementów urządzenia. Czyli, celem nie jest zapewnienie całkowitej niezawodności urządzenia jako takiego, lecz zapewnienie takiej jego niezawodności, jaka jest ekonomicznie uzasadniona i wymagana dla realizowania oczekiwanej funkcjonalności w istniejących warunkach użytkowania. Aby podjąć właściwe decyzje eksploatacyjne metodyka RCM wymaga odpowiedzi na poniższe podstawowe pytania [48],[61],[78]:

- Jakie są funkcje urządzenia oraz granice ich realizacji?
- W jaki sposób urządzenie przestaje spełniać swoje funkcje?
- Jakie są przyczyny nie realizowania funkcji?
- Jakie objawy towarzyszą uszkodzeniom funkcjonalnym?
- Jakie znaczenie ma dla nas każde uszkodzenie?
- Co należy zrobić by przewidzieć lub zapobiec uszkodzeniu?
- Co zrobić, gdy nie możemy przewidzieć lub zapobiec uszkodzeniu?



Rys. 29. Proces analiz RCM [61]

Schematycznie proces ten został pokazany na rysunku 29.

Stosując logikę RCM, to znaczy prowadząc analizy udzielające odpowiedzi na powyższe pytania, możemy dokonać optymalizacji dotychczasowych planów eksploatacyjnych lub sformułować nowe, zapewniając jednocześnie ich maksymalną efektywność i dostosowanie do specyficznych potrzeb użytkownika. Natomiast przy tworzeniu centrum diagnostycznego ważne jest, stworzyć mechanizmy pozwalające na gromadzenie odpowiednich informacji potrzebnych do przeprowadzenia w przyszłości analiz RCM.

3.1.2 Model eksploatacyjny napędu zwrotnicowego

Zgodnie z założeniami metody RCM konieczne jest rozpoczęcie od przeprowadzenia analizy funkcjonalnej obiektu. Do analizy funkcjonalnej napędu zwrotnicowego EEA-5 użyto diagramów graficznych języka UML [90]. W języku UML model systemu ma postać diagramów graficznych. Każdy rodzaj diagramu pokazuje te elementy przyszłego systemu, które są istotne z wybranego punktu widzenia, a pomija bądź upraszcza inne elementy. Wysoki poziom abstrakcji pozwala na zwięzły opis nawet bardzo dużych systemów. Jest on uzupełniany o opis werbalny w postaci scenariuszy oraz komentarzy lub innych informacji.

Terminologia i nazewnictwo używana w UML może być wykorzystana do projektowania systemów utrzymania zwłaszcza jako narzędzie do sporządzania dokumentacji na kolejnych etapach projektowania. Komputerowe systemy wspomagające projektowanie mogą być wykorzystywane do zarządzania wymaganiami użytkowników i urządzeń oraz procesem projektowania.

Stosowanie UML pozwala na ujednolicenie nazewnictwa, wczesne wykrywanie braków i niespójności w specyfikacji wymagań oraz zapewnienie zgodności użytych nazw. Użycie sformalizowanej, graficznej formy dokumentowania ułatwia komunikowanie i zrozumienie się członków zespołu projektowego. Wspólny język powinien ułatwić precyzyjne określenie przeznaczenia, funkcji i własności projektowanego produktu i jego elementów składowych.

W ramach analizy funkcjonalnej napędów wykorzystano następujące typy diagramów UML [90]:

diagramy statyczne:

- diagram przypadków użycia (*use cases*)

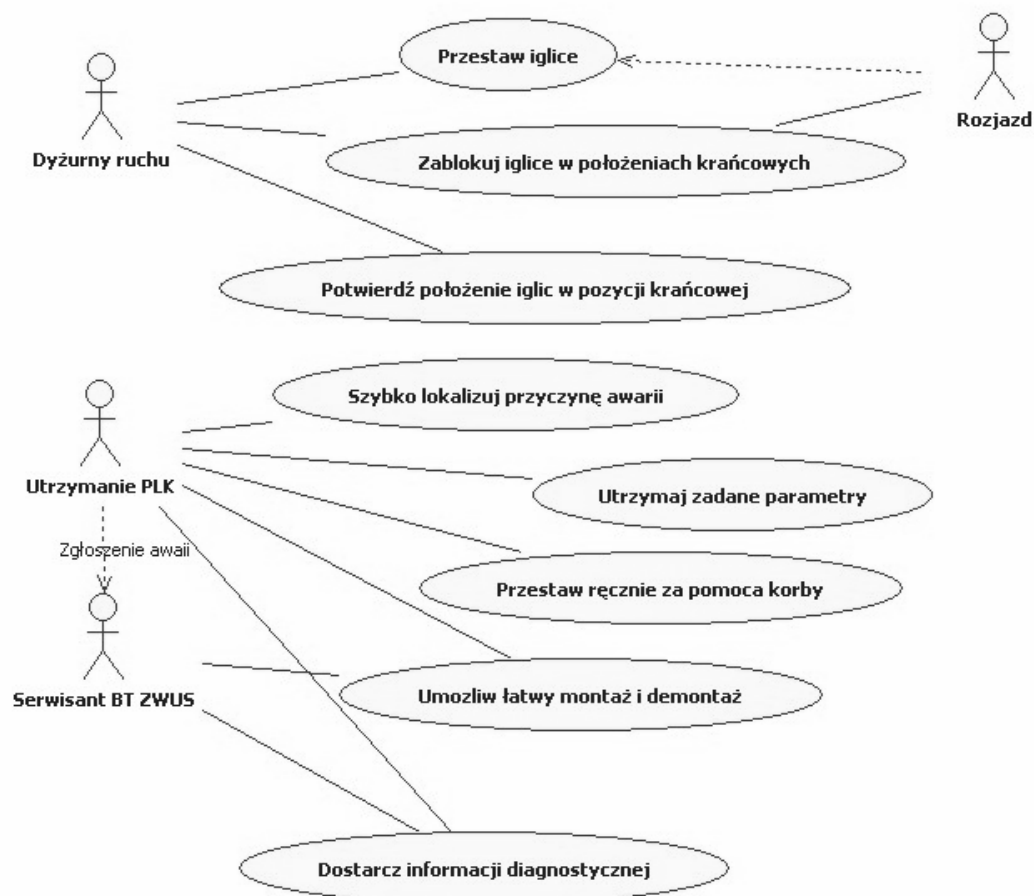
diagramy dynamiczne (behawioralne):

- diagram sekwencyjny

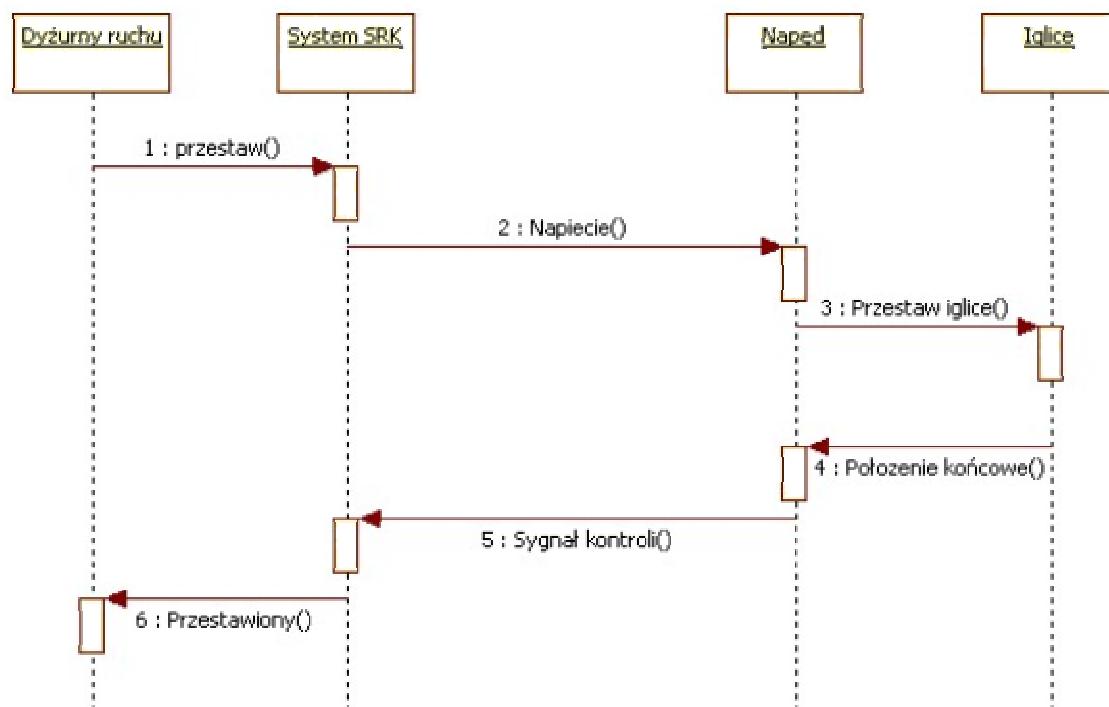
diagramy implementacyjne:

- diagram komponentów

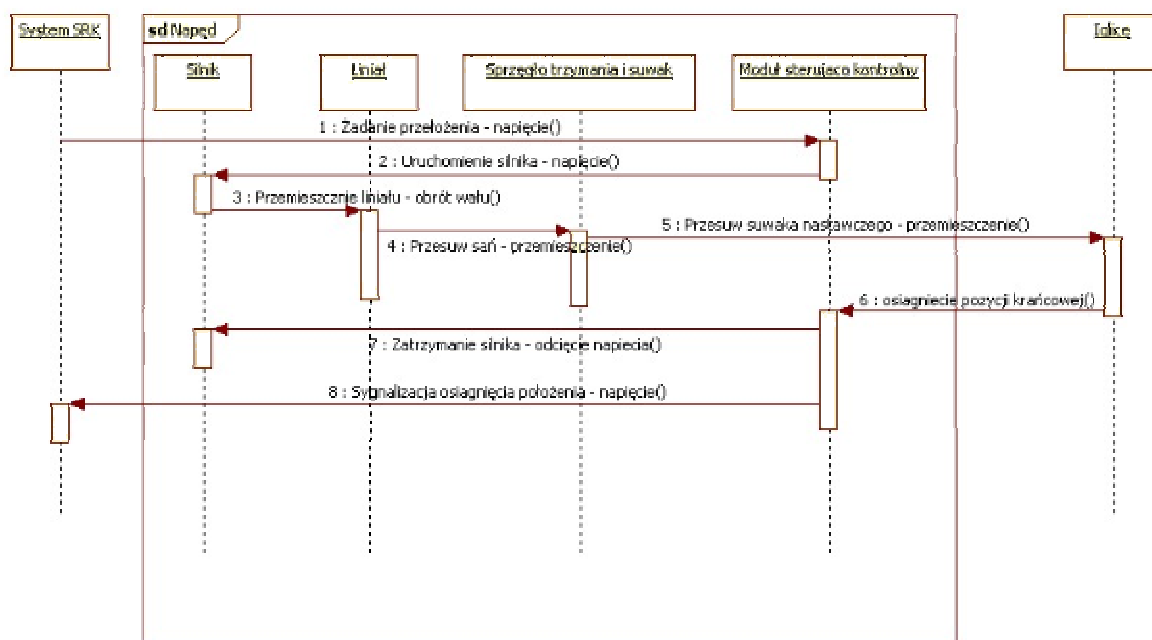
Dla lepszego zobrazowania funkcjonalności napędu wykorzystano diagram typu „Use case”. Diagram przypadków użycia dla napędów zwrotnicowych opisujący system eksploatacji i wymagań funkcjonalnych przedstawiono schematycznie na rysunku 30. Na rysunku 31 przedstawiono diagram sekwencji działania napędu zwrotnicowego sterowanego z systemu sterowania i podłączonego do zwrotnicy kolejowej, natomiast na rysunku 33 przedstawiono diagram komponentów całego systemu. Sekwencję działania wewnętrznego mechanizmu napędu przedstawiono schematycznie na rysunku 32.



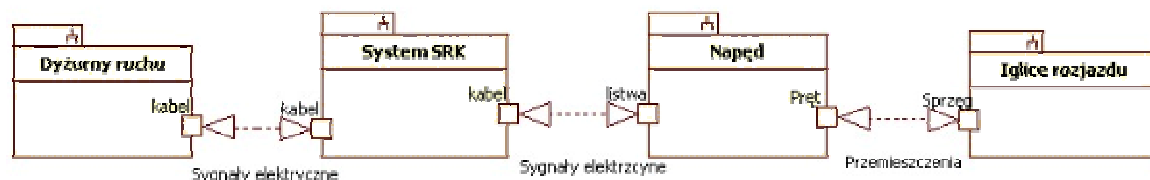
Rys. 30. Diagram przypadków użycia dla napędów zwrotnicowych



Rys. 31. Diagram sekwencji dla systemu eksploatacji napędu



Rys. 32. Diagram sekwencji działania napędu EEA-5



Rys. 33. Diagram komponentów systemu eksploatacji

Z diagramu UML możemy odczytać, jakie komponenty występują w systemie eksploatacji napędu. Jest to bardzo przydatne gdyż widać wyraźnie, że poza samym napędem każdy z pozostałych komponentów może stać się potencjalnym źródłem usterek pojawiających się w systemie eksploatacyjnym.

Na podstawie diagramów, zgodnie z metodyką RCM, zdefiniowano funkcje napędu a następnie możliwe niesprawności (wynikające z funkcjonalności napędu). Wyniki postępowania przedstawia poniższa tabela 1.

Tabela 1

FUNKCJA	UWAGI	USTERKA
1. Przesławiać płynnie rozjazd z odpowiednią siłą w określonym czasie		A. Całkowity brak przesławiania B. Zbyt mała siła przesławiania C. Zbyt długi czas przesławiania D. Nierównomierne przesławianie
2. Utrzymywać iglice rozjazdu w skrajnym położeniu z odpowiednią siłą		A. Całkowity brak trzymania (brak blokady) B. Zbyt mała siła trzymania
3. Sygnalizować położenie iglic zwrotnicy		A. Brak sygnalizacji położenia iglic B. Błędna sygnalizacja położenia iglic
4. Zapewnić możliwość dokonania ręcznego przesławiania rozjazdu za pomocą korby, przy jednoczesnym odcięciu zasilania silnika		A. Brak możliwości dokonania ręcznego przesławiania iglic B. Brak odcięcia zasilania silnika
5. Umożliwić rozprucie zwrotnicy po przekroczeniu odpowiedniej siły	dla napędu rozpruwalnego	A. Rozjazd nie daje się rozpruć B. Rozprucie następuje przy sile mniejszej niż 7kN

Kolejnym etapem procesu RCM jest analiza istniejącej historii eksploatacyjnej obiektu. Pozwala to na opracowanie modelu awaryjności jak również dokonanie wstępnej oceny eksploatacyjnej obiektu będącego przedmiotem implementacji procedur RCM.

Ponieważ w praktyce brak jest dostępnej historii eksploatacyjnej napędów zwrotnicowych i rozjazdów przeprowadzono pilotażowe badania eksploatacyjne na wybranych stacjach kolejowych. W dalszej części pracy zostaną przedstawione wyniki tych badań.

3.2. Badania eksploatacyjne, ocena niezawodności i trwałości napędów

Ze względu na różną budowę napędów typu EEA-4 i EEA-5, co wiąże się z występowaniem odmiennych przyczyn i rodzajów powstawania niesprawności, analiza usterkowości przeprowadzona zostanie dla każdego typu osobno.

Cel badania

Celem badań było określenie usterkowości eksploatowanych na sieci kolejowej napędów zwrotnicowych i zwrotnic, próba określenia ich przyczyn oraz ewentualne znalezienie odpowiedniej informacji serwisowej (symptomu diagnostycznego) na potrzeby systemu monitorowania ich stanu technicznego.

3.2.1 Opracowanie metodyki rejestracji czynności serwisowych

Dane dotyczące awaryjności urządzeń mogą być gromadzone w wyniku badań prototypów urządzeń jak również w trakcie eksploatacji. W każdym z przypadków istnieje konieczność wykorzystania formalnych dokumentów będących swego rodzaju raportami. Pozwala to uzyskać pewność, że zebrane informacje są właściwe i kompletne. Dane pochodzące z eksploatacji są zazwyczaj dużo bardziej wartościowe, gdyż dotyczą uszkodzeń i napraw odbywających się w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Zbieranie takich danych musi odbywać się jednak za pomocą formalnych dokumentów (raportów), aby wyeliminować wszelkiego rodzaju błędy, niekompletności i różnice interpretacyjne. Tego typu informacje mogą być następnie wykorzystane dla różnych celów, przede wszystkim są one źródłem informacji dla oceny niezawodności skutkującego dyspozycyjności analizowanych urządzeń. Przede wszystkim analizy te pozwalają na określenie, które z funkcji należy monitorować. W ramach badań opracowano metodykę tych analiz i przeprowadzono badania historii eksploatacji napędów zwrotnicowych na wybranych stacjach.

W wyniku przeprowadzonych prac analitycznych oraz konsultacji z ekspertami ustalono, że formularz służący do gromadzenia informacji serwisowej (zwany dalej formularzem serwisowym) powinien zawierać informacje dotyczące między innymi:

- Czasu naprawy
- Przedmiotu awarii (usterki)
- Typu awarii (usterki)
- Przyczyny awarii (przyczyny bezpośredniej, źródeł)
- Warunków środowiskowych (warunki atmosferyczne)
- Wykonanych czynności serwisowych
- Listę wymienionych elementów

Na tej bazie oraz biorąc pod uwagę ograniczone możliwości uzyskania informacji od użytkownika napędów (PKP PLK S.A.), opracowano wzory formularzy oraz bazę danych pozwalającą na rejestrację koniecznych danych serwisowych.

3.2.1.1 Analiza historii eksploatacyjnej

Po dokonaniu wstępnej analizy dostępności informacji serwisowej u użytkownika napędów i rozjazdów, jakim jest przedsiębiorstwo Polskie Linie Kolejowe (jeden zarządca infrastruktury kolejowej w Polsce), jak również w wyniku odbytych spotkań wytypowano stacje, które objęte zostały następnie badaniami. W pierwszym etapie prac dokonano analizy wpisów serwisowych dostępnych w „książkach kontroli urządzeń sterowania ruchem kolejowym E-1759” prowadzonych przez użytkownika na poszczególnych stacjach. Następnie w ramach porozumienia z użytkownikiem rozpoczęto na trzech stacjach w Krakowie pilotażowe badania awaryjności i serwisu układów napęd-rozjazd. Polegały one na rejestracji wszystkich czynności serwisowych wykonanych przez użytkownika. Zarówno informacje pochodzące z wpisów z książek kontroli jak i te bezpośrednio wpływające od pracowników utrzymania, zostały przeniesione do przygotowanej w tym celu bazy danych mogącej być częścią serwisowej bazy wiedzy diagnostycznej [90].

3.2.1.2 Baza danych

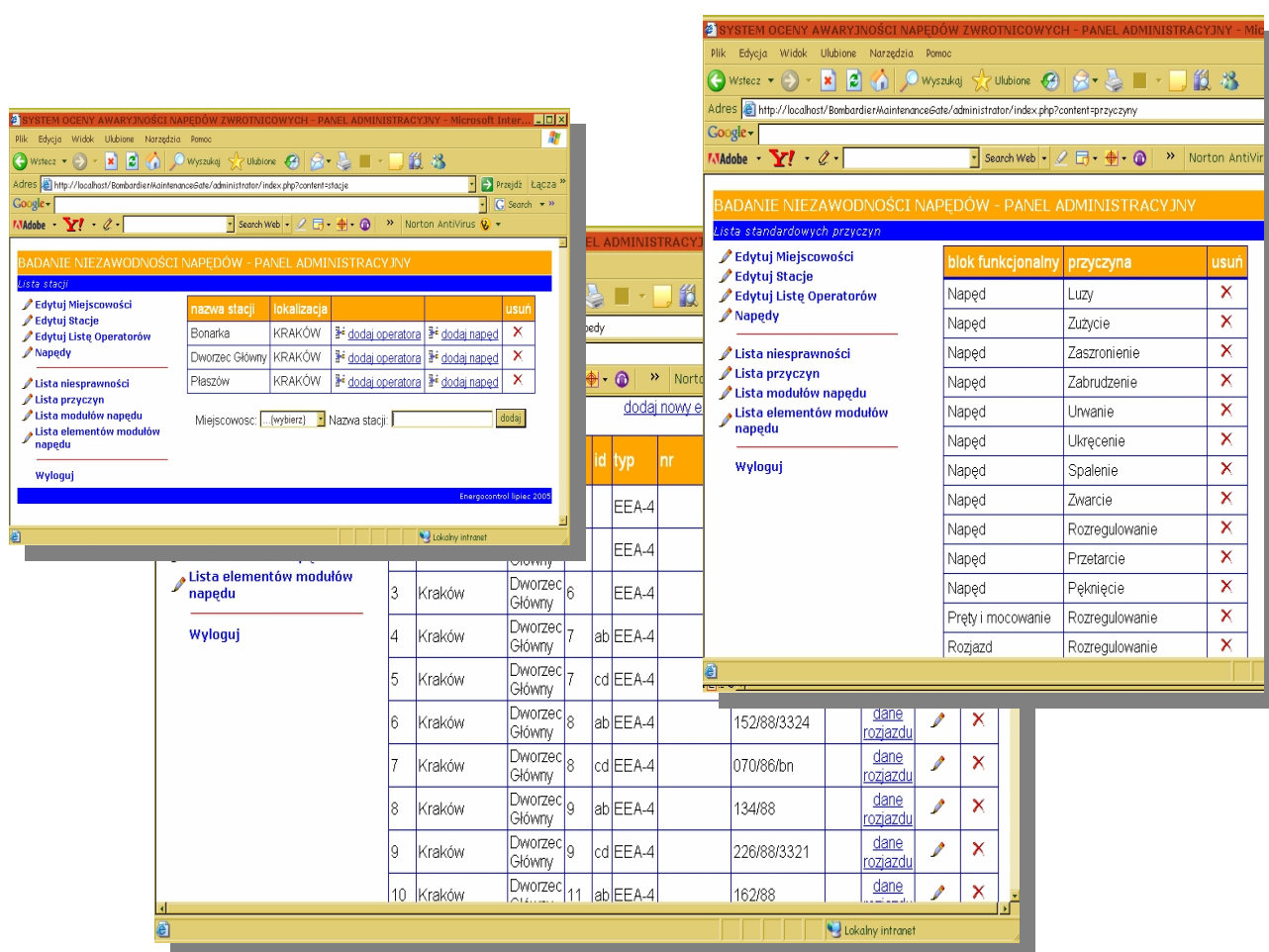
Dysponując wiedzą dotyczącą systemu eksploatacji i utrzymania napędów zwrotnicowych, oraz przykładowymi informacjami zawartymi w książkach kontroli, podjęto prace dotyczące opracowania prototypu systemu bazy danych.

Stworzona architektura bazy danych oferuje następującą funkcjonalność:

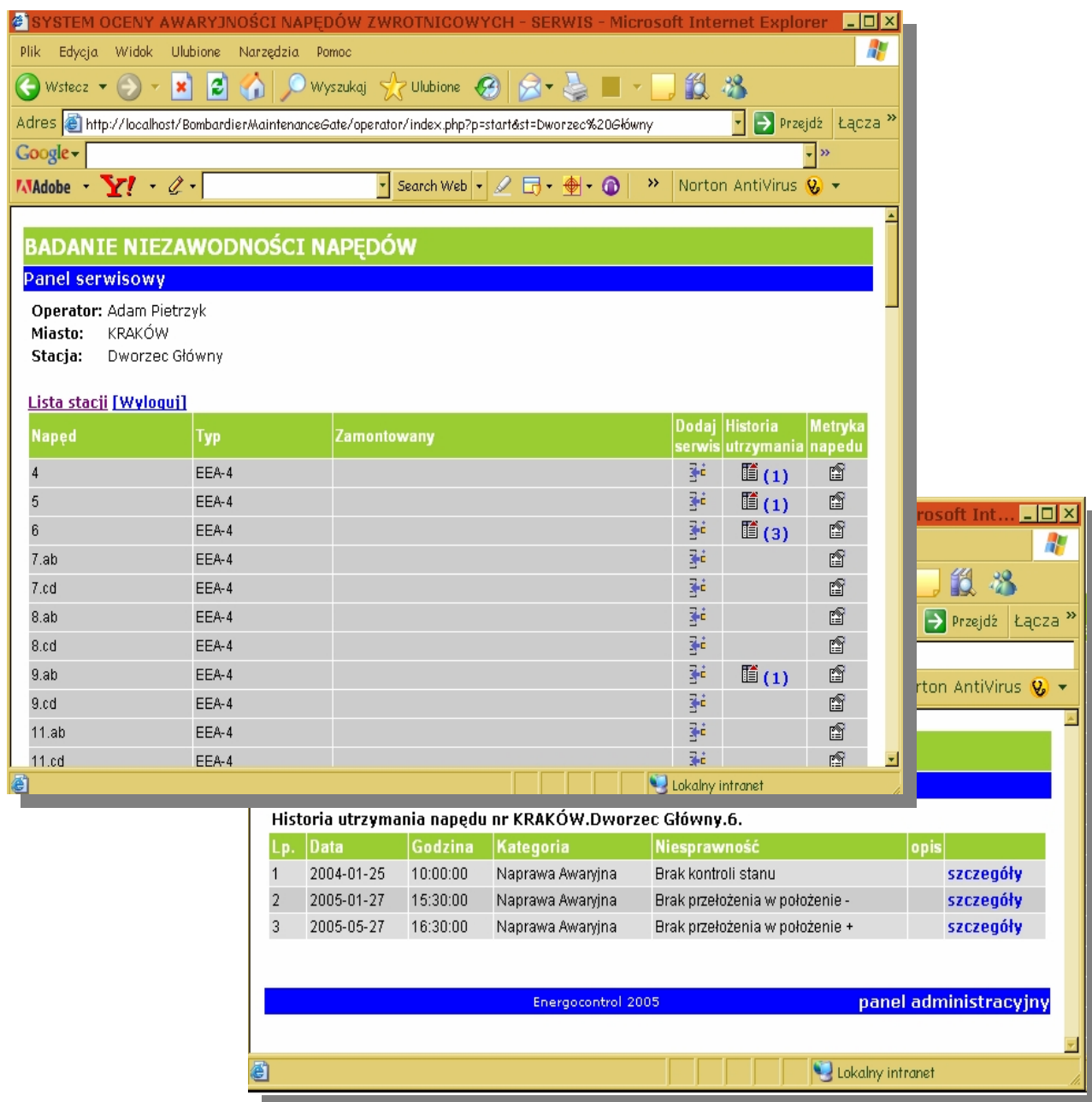
- przechowywanie informacji o użytkownikach
- przechowywanie informacji eksploatacyjnych
- przechowywanie informacji dotyczących napędów i rozjazdów
- przechowywanie informacji dla słowników pojęciowych
- przechowywanie informacji pochodzącej z serwisów

Następnie opracowane zostały interfejsy użytkownika pozwalające na zarządzanie przechowywaną w prototypowej bazie danych informacją. Służyły do tego dwa rodzaje interfejsów, dla administratora oraz operatora [90].

Interfejs administratora umożliwia przede wszystkim zarządzanie użytkownikami, stacjami i informacjami słownikowymi. Pozwala również na wprowadzenie do systemu informacji o napędach i rozjazdach. Przykładowe ekrany interfejsu administratora przedstawia rysunek 34.

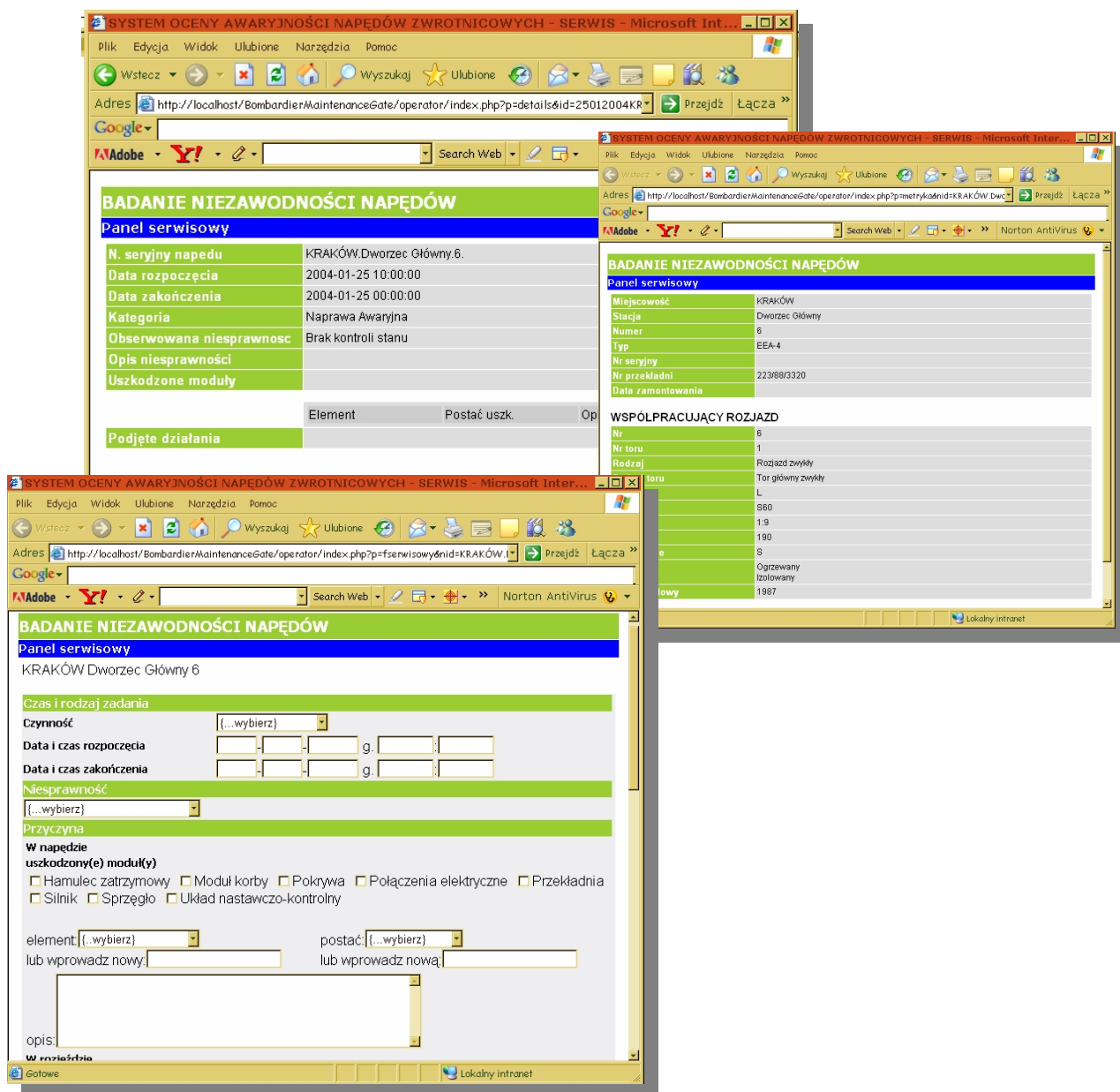


Rys. 34. Ekrany interfejsu administratora



Rys. 35. Ekrany interfejsu operatora

Interfejs operatora, dzięki przeniesieniu do postaci elektronicznej wcześniej opracowanych formularzy serwisowych, pozwolił na wprowadzanie informacji dotyczącej wykonanych czynności serwisowych dla każdego zarejestrowanego na stacji napędu. Przykładowe ekrany interfejsu operatora przedstawiają rysunki 35 i 36.



Rys. 36. Ekrany interfejsu operatora

Dzięki odpowiednio przygotowanym formularzom oraz bazie danych serwisowych, uzyskano możliwość obróbki statystycznej wyników oraz łatwego przeglądania

historii działań serwisowych na danym napędzie. Pozwoliło na dużo efektywniejsze opracowanie wyników badania.

3.3. Analiza zapisów serwisowych

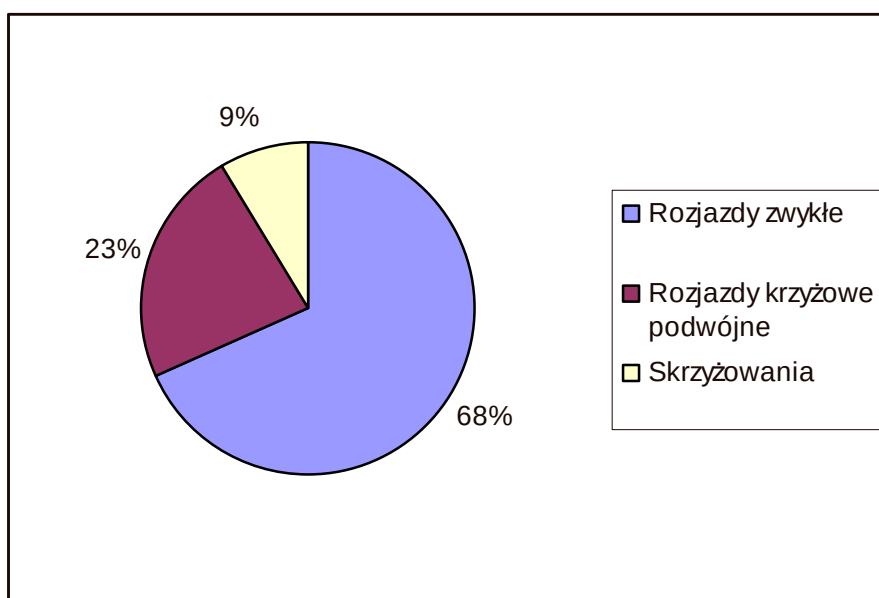
Dla określenia usterkowości eksploatowanych na sieci kolejowej napędów zwrotnicowych i zwrotnic przeprowadzono analizę zarejestrowanych działań serwisowych badanych napędów. W pierwszej części analizy przedstawiono opis statystyczny badanego poligonu badawczego z podziałem na typy napędów EEA-4 i EEA-5, natomiast druga część zawiera analizę statystyczną występowania awarii jak również ich typów.

3.3.1 Napęd zwrotnicowy EEA-4

3.3.1.1 Opis poligonu z napędami EEA-4

Wszystkie analizowane napędy typu EEA-4, w ilości 108, zlokalizowane były w obrębie stacji Kraków Dworzec Główny.

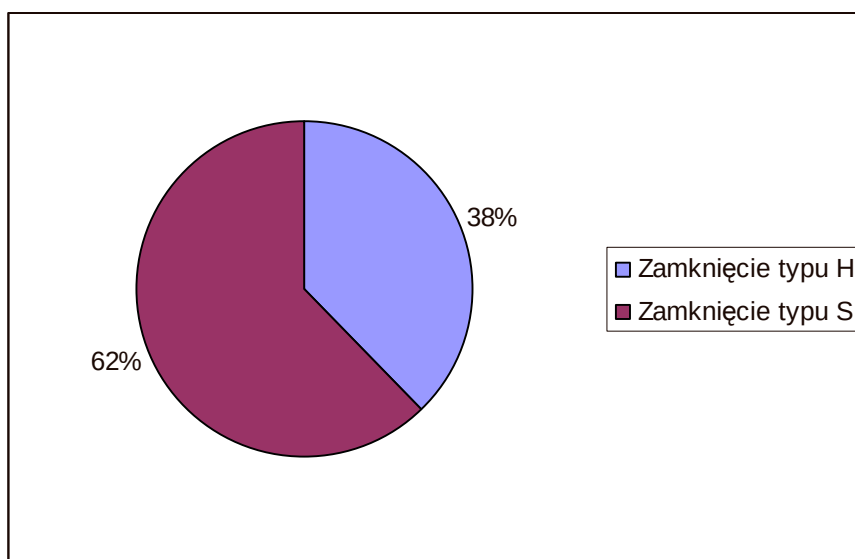
Napędy te współpracowały z rozjazdami różnych typów. Ze względu na rodzaj współpracującego rozjazdu analizowane napędy możemy podzielić na trzy grupy, co przedstawiono na rysunku 37.



Rys. 37. Rodzaje rozjazdów

Wśród badanych napędów EEA-4, najliczniejszą grupę stanowiły napędy współpracujące z rozjazdami zwykłymi 68%.

Ze względu na typ zamknięcia nastawczego rozjazdu; hakowe (H), suwakowe (S), obserwowane rozjazdy możemy podzielić na dwie grupy, co przedstawiono na rysunku 38. Zamknięcia suwakowe są zamknięciami o nowszej konstrukcji i w chwili obecnej nowe rozjazdy wyposażane są tylko w ten typ zamknięć.



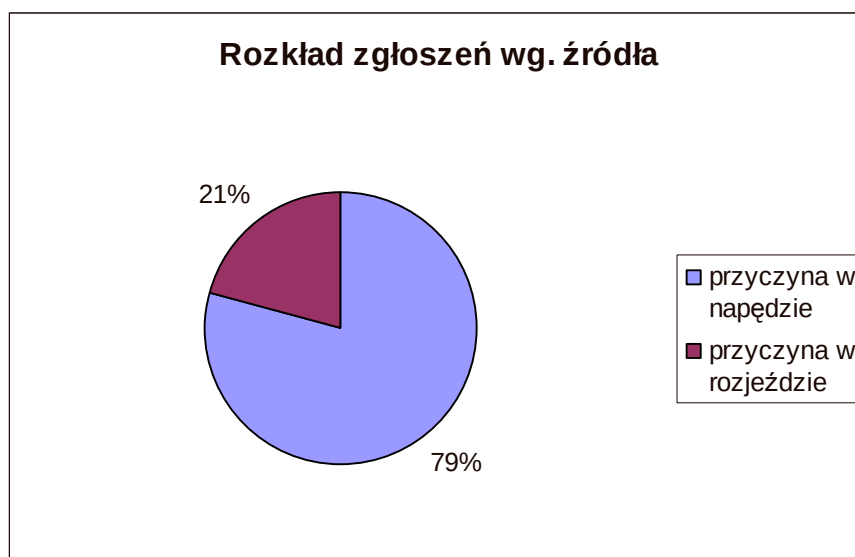
Rys. 38. Rodzaje zamknięcia w zwrotnicy

Większość rozjazdów (78%) została zamontowana przed rokiem 1990, pozostałe zamontowano po roku 1990 (22%). Na podstawie powyższych danych widać wyraźnie, że infrastruktura kolejowa charakteryzuje się wieloletnim okresem eksploatacji i większość rozjazdów zabudowanych na tej stacji ma ponad 15lat.

3.3.1.2 Analiza awaryjności napędów EEA-4

Do systemu informatycznego wprowadzono wpisy działań serwisowych dokonane w okresie 29.11.2003 – 01.03.2006 (824 dni). W tym okresie odnotowano łącznie 73 zgłoszenia dotyczące niewłaściwego funkcjonowania układów napęd-rozjazd.

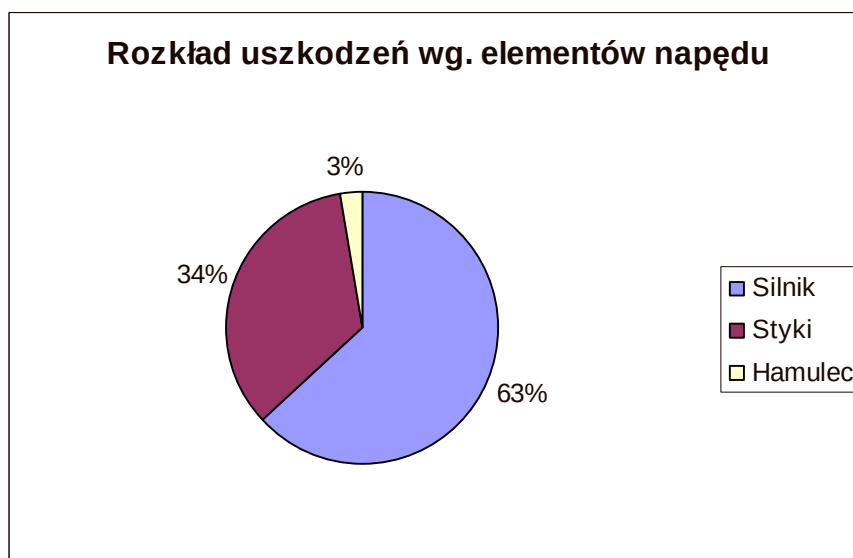
Analiza tych zapisów pozwoliła ustalić, że 38 awarie dotyczyło uszkodzeń napędów, 10 dotyczyło rozjazdów, 5 dotyczyło prętów umocowania. Odnotowano również 19 zapisów, niepozwalających na właściwe sklasyfikowanie. Biorąc pod uwagę awarie sklasyfikowane do napędów i rozjazdów to 79% dotyczy napędów a 21% rozjazdów (rysunek 39).



Rys. 39. Źródła usterek dla rozjazdów z napędami EEA-4

Analizując grupę awarii dotyczącą napędów, można stwierdzić, że najwięcej, bo 24 zgłoszone usterki stanowiły awarie silnika (spalenie lub ukłucie wałka wirnika). Jest to bardzo znaczący procent (63%) tym bardziej, że dotyczy podstawowego elementu napędu.

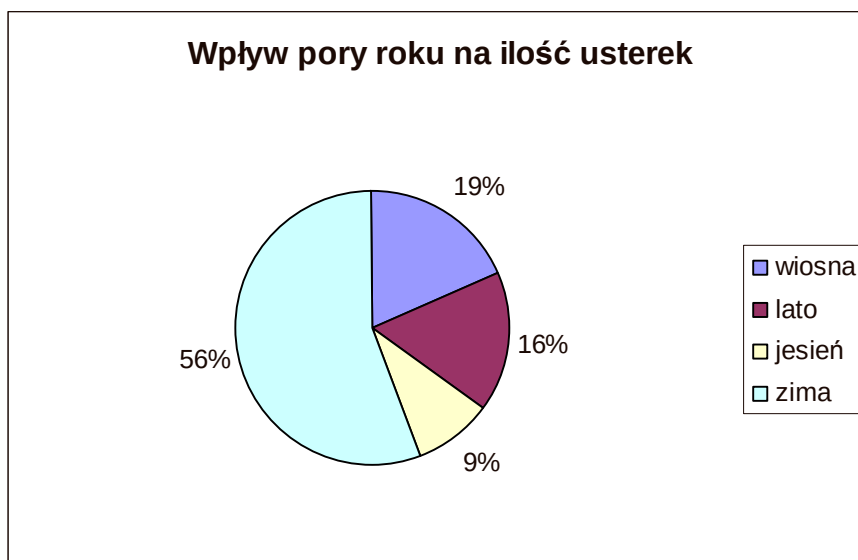
Druga obserwowana grupa usterek (13%) była związana z połączeniami elektrycznymi (styki, przewody). Przedstawiono to na rysunku 40.



Rys. 40. Przyczyny awaryjności napędu EEA-4 wg elementów napędu

Biorąc pod uwagę ilość napędów oraz okres analizy można określić częstość występowania awarii dla silnika na 0.098/rok, natomiast dla połączeń elektrycznych jest to wartość 0.053/rok. Wynik ten sugeruje stosunkowo duże wartości MTBF

jednak jak pokazało badanie, częstość nie jest stała i wzrasta w okresie zima/wiosna. Analiza wpływu pory roku (warunków atmosferycznych) wykazała, że w przypadku zgłoszeń związanych z awarią napędu pora roku jest czynnikiem istotnym. Większość obserwowanych usterek miała miejsce w okresie zimowym i wiosennym (rysunek 41).



Rys. 41. Wpływ pory roku

Analiza eksploatacyjna nie wykazała znaczącej awaryjności innych elementów napędu.

3.3.2 Napęd zwrotnicowy EEA-5

3.3.2.1 Opis poligonu z napędami EEA-5

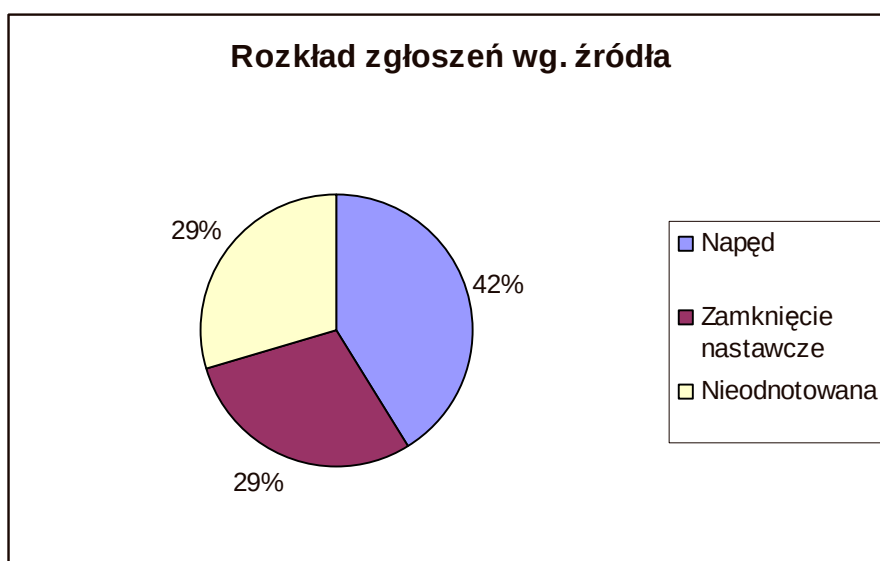
Analizowane napędy typu EEA-5, w ilości 25 szt., zlokalizowane były w obrębie dwóch stacji: Kraków Płaszów (16 szt.) i Kraków Bonarka (9 szt.). Mniejsza liczba badanych napędów EEA-5 wynika z faktu, iż napędów tych na sieci kolejowej jest zainstalowanych znacząco mniej niż napędów starszej generacji typu EEA-4.

Badane napędy współpracowały z rozjazdami krzyżowymi podwójnymi o promieniu R190 z zamknięciami typu suwakowego. Większość rozjazdów została zamontowana przed rokiem 1990.

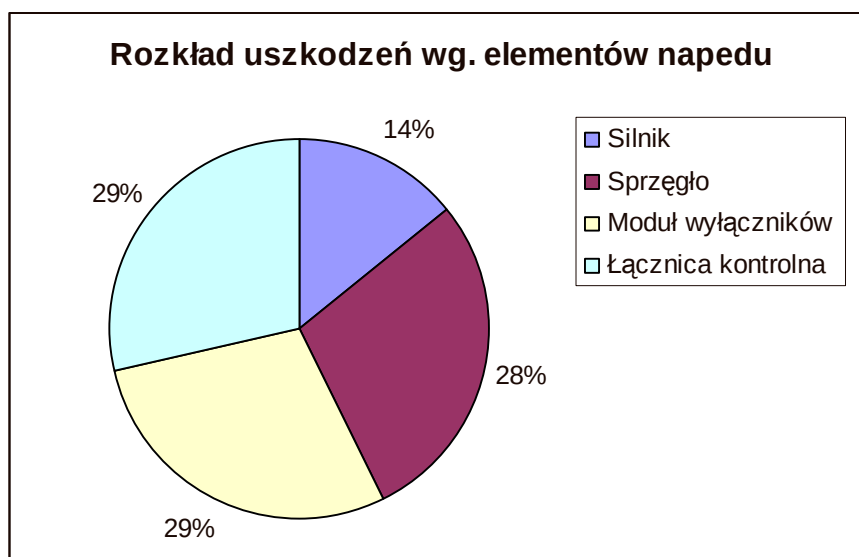
3.3.2.2 Ocena awaryjności EEA-5

Do systemu informatycznego wprowadzono wpisy dokonane w okresie 20.09.2004 – 06.03.2006 (532 dni). W tym okresie odnotowano łącznie 17 zgłoszeń dotyczących niewłaściwego funkcjonowania układu napęd-rozjazd. Z czego 7 stanowiły wpisy dotyczące napędu, 5 rozjazdu i w 5 przypadkach nie odnotowano przyczyny usterki. Na rysunku 42 pokazano rozkład procentowy sklasyfikowanych usterek. Awarie dotyczące napędów EEA-5 stanowiły 42%, natomiast dotyczące rozjazdów i te niesklasyfikowane po 29%.

Zgłoszone usterki w napędzie dotyczyły sprzęgła siły nastawczej (2 zgłoszenia), wyłączników krańcowych (2), okablowania (2) oraz silnika (1). Rozkład procentowy przedstawiono na rysunku 43.



Rys. 42. Źródła usterek dla rozjazdów z napędami EEA-5



Rys. 43. Przyczyny awaryjności napędu EEA-5 wg elementów napędu

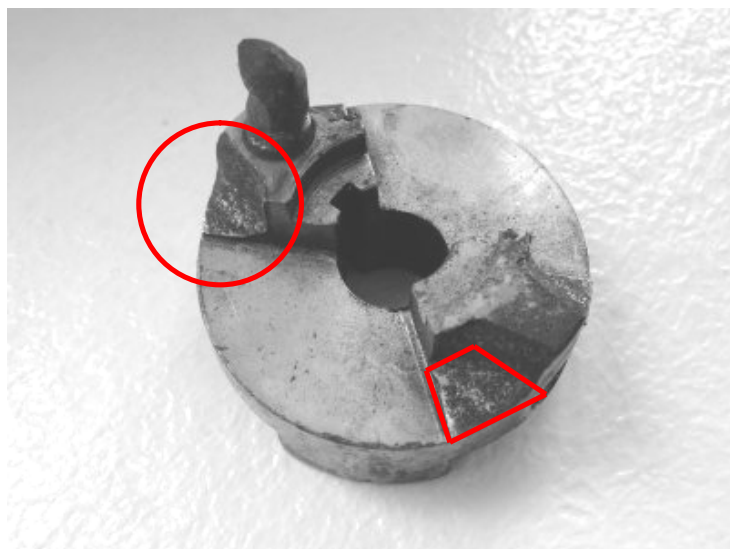
Ze względu na stosunkowo małą próbkę obserwowanych napędów oraz niewielką liczbę zgłoszeń nie można precyzyjnie ocenić niezawodność tych napędów, a wyniki należy rozważać w kategoriach jakościowych.

3.3.3 Subiektywna ocena i opinie pracowników utrzymania

Oprócz w dużej mierze obiektywnej oceny awaryjności napędów EEA-4 i EEA-5, jaką można uzyskać na podstawie opracowania statystycznych wyników, w ramach prowadzonych prac zwrócono się do pracowników serwisu użytkownika z prośbą o dokonanie ich subiektywnej oceny awaryjności tych napędów. Należy zauważyć że w powszechnej opinii pracowników, napędy zwrotnicowe nie należą do urządzeń silnie awaryjnych na tle innych urządzeń automatyki kolejowej. Jednak w przypadku napędu typu EEA-4 zgłoszono problem nadmiernego zużywania się elementów hamulca zatrzymowego (rysunek 44) jak i powracające w okresie zimowym problemy szronienia zestyków. Problem nadmiernego zużycia dzięki profilaktycznym działaniom serwisowym, nie objawia się w postaci awarii napędu, jednak niska trwałość tego elementu powoduje wzrost niedyspozycyjności oraz kosztów eksploatacyjnych ponoszonych przez użytkownika.

Problem szronienia zestyków ma istotne znaczenie eksploatacyjne gdyż jest to usterka wywołana losowo zmieniającymi się warunkami atmosferycznymi i pojawiająca się jednocześnie w większości napędów. Jeżeli dodatkowo uwzględnimy jeszcze obserwowane przypadki awarii silników, to w przypadku stacji z dużą ilością

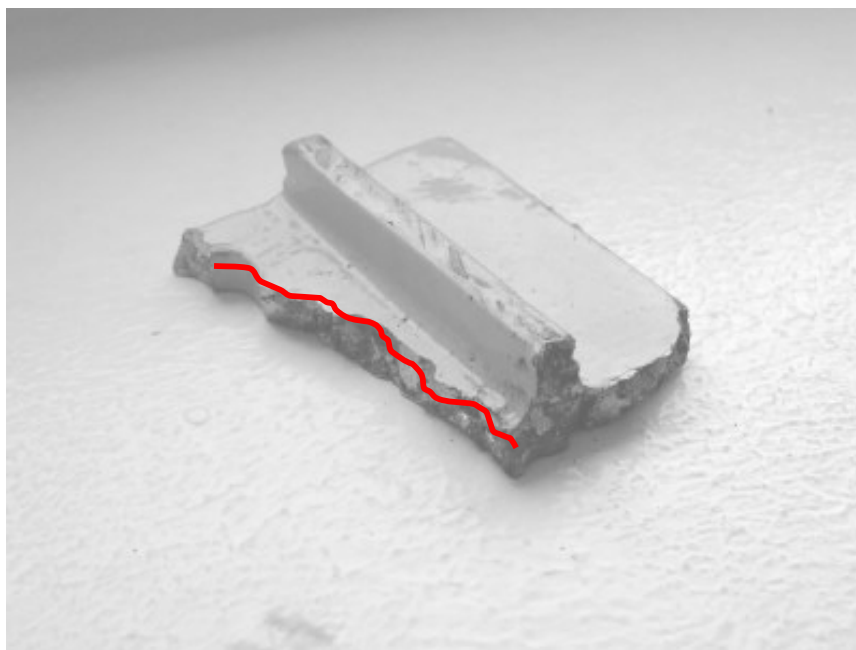
napędów typu EEA-4, liczba obserwowanych zgłoszeń serwisowych może być znacząca. Na poniższym rysunku 44 przedstawiono przykładowe postacie wybicia (zużycia) elementów hamulca.



Rys. 44. Zużycia elementów hamulca zatrzymowego napędu EEA-4

W przypadku napędów typu EEA-5 zgłaszane zastrzeżenia dotyczyły przede wszystkim, wycofanych przez producenta, sprzęgieł siły nastawczej starszego typu. Należy zwrócić uwagę, iż obserwowana częstość awarii tego elementu napędu EEA-5 była wysoka. Ich awarie związane były z pękaniem sprężyn talerzowych, co obserwowano zwłaszcza w okresie zimowym. W okresie tym ze względu na trudne warunki eksploatacyjne wzrastają opory przestawiania rozjazdów, co powoduje

zwiększenie obciążenia dla napędu a tym samym dla sprzęgła. Dodatkowo uwagi przekazane przez użytkownika dotyczyły jakości materiałów i wykonania płyty osłony silnika (rysunek 45), oraz zawleczek do elementów mechanicznych.



Rys. 45. Fragment ułamanej płyty osłony silnika

Jednak są to z reguły elementy drobne niewpływające bezpośrednio na niezawodność napędu, lecz powodujące negatywne opinie wśród użytkowników.

3.4. Podsumowanie badań

Z analizy przeprowadzonej dla napędów EEA-4 wynika, że napędy te wykazują stosunkowo dużą zawodność zwłaszcza w warunkach zimowych. Jest to spowodowane awaryjnością silników i problemami z oszranianiem się styków.

W przypadku napędów EEA-5 ze względu na małą liczbę obserwowanych próbek i zgłoszeń nie można przeprowadzić precyzyjnej oceny niezawodności tych napędów.

Jednak, zarówno okres zimowy występowania awarii jak i zidentyfikowane typy uszkodzeń obu napędów (awarie silników, pękanie sprężyn w sprzęgłach przeciążeniowych) wydają się wskazywać, że przyczyna usterek leży w zwiększonych oporach przestawiania rozjazdów. Powoduje to zwiększenie obciążenia mechanicznego i elektrycznego dla napędów. W wyniku, czego szybszemu zużyciu i w ostateczności uszkodzeniu ulegają silnik lub sprzęgło oraz

elementy układu elektrycznego. Dodatkowo napędy zwrotnicowe EEA-5 współpracowały z rozjazdami krzyżowymi, które konstrukcyjnie mają dużo większe opory przestawiania niż rozjazdy zwyczajne.

Stosując metodykę RCM możemy określić, iż podstawowe znaczenie dla zapewnienia odpowiedniej niezawodności napędu zwrotnicowego ma monitorowanie funkcji przestawiania rozjazdu z odpowiednią siłą w określonym czasie. Dla pozostałych funkcji, podczas przeprowadzonych badań nie zanotowano usterek a funkcja sygnalizacji położenia zwrotnicy jest w sposób ciągły monitorowana poprzez nadrzędny system sterowania.

Na podstawie powyższej analizy wydaje się, iż monitorowanie siły oporów przestawiania zwrotnicy, jakie napęd zwrotnicowy musi pokonać w czasie przestawiania może posłużyć jako symptom diagnostyczny na potrzeby systemu monitorowania i diagnostyki stanu technicznego układu napęd-zwrotnica.

W celu opracowania systemu monitorowania i diagnostyki napędu w pierwszej kolejności przeprowadzono badania symulacyjne układu napęd-rozjazd.

4. Badania symulacyjne układu napęd – zwrotnica

Dla potwierdzenia tezy, iż siła oporów przestawiania zwrotnicy może posłużyć jako symptom diagnostyczny na potrzeby systemu monitorowania i diagnostyki stanu technicznego układu napęd-zwrotnica przeprowadzono symulacyjne badania tego układu. W tym celu przeprowadzono symulację modelu wielobryłowego zwrotnicy UIC 60-1:9 R300 przestawianej napędem zwrotnicowym typu EEA-5 i szereg analiz dla określenia wpływu różnych niesprawności na zachowanie układu monitorowanego poprzez założony symptom, w szczególności ich wpływ na przebieg zmienności siły przestawiania w czasie. Do symulacji wybrano rozjazd zwyczajny o promieniu R300, gdyż jest to najbardziej popularny typ rozjazdu stosowanego w Polsce. Zaobserwowano to również na stacji Kraków Dworzec Główny gdzie 68% rozjazdów była właśnie tego typu. Jako napęd zwrotnicowy wybrano typu EEA-5, który jest aktualnie najszerzej stosowanym napędem przy realizacji nowych inwestycji i wypiera swojego poprzednika EEA-4. Ten ostatni, z informacji otrzymanych od producenta, obecnie jest stosowany sporadycznie w ilościach jednostkowych.

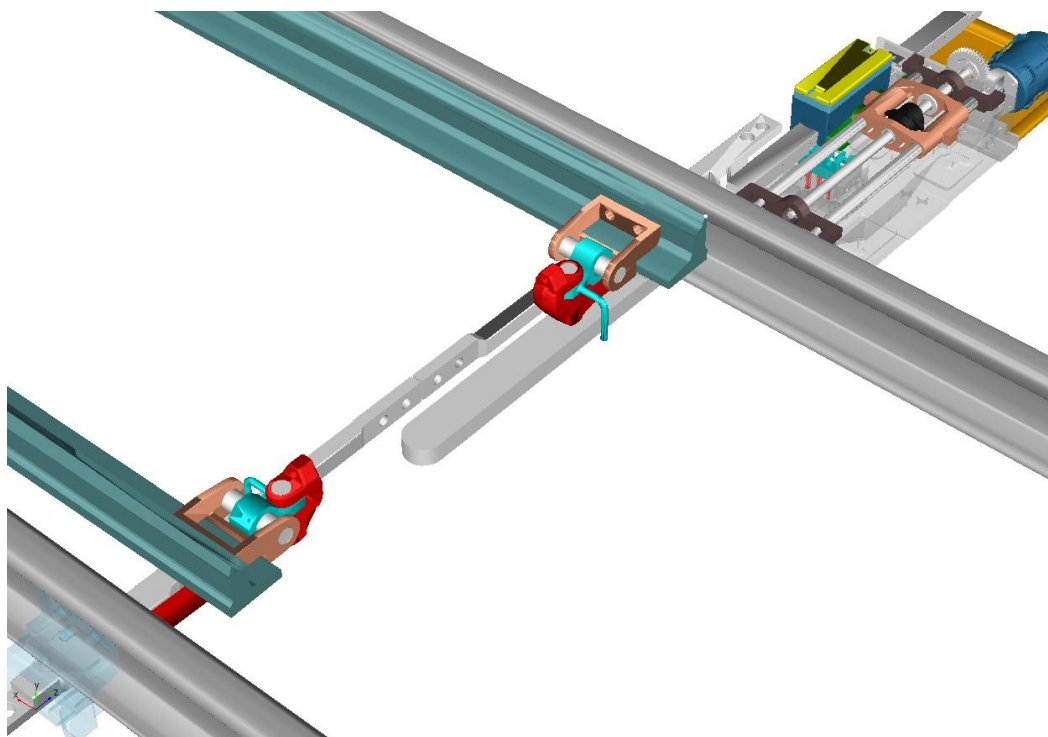
Do symulacji zastosowano oprogramowanie MSC ADAMS. Wartości sił zostały wyznaczone na podstawie modelu układu zrealizowanego w postaci modelu wielobryłowego. Jako rezultat przeprowadzonych symulacji otrzymano wykres siły oporów przestawiania mierzony na suwaku nastawczym napędu w trakcie przestawiania zwrotnicy oraz wykres momentu napędowego w czasie przestawiania [91].

4.1. Model wielobryłowy

W programie MSC ADAMS zbudowano model wielobryłowy napędu zwrotnicowego, wraz z elementami zwrotnicy i zamknięcia suwakowego, pokazany na rysunku 46.

Przy budowie modelu przyjęto następujące założenia dla napędu:

Skok napędu 220mm, obroty silnika 1400obr/min, skok śruby kulowej 5mm/obrót, przełożenie przekładni 1:2.



Rys. 46. Model wielobryłowy zwrotnicy z napędem zwrotnicowym.

Model składa się z następujących głównych elementów:

Napęd zwrotnicowy:

- Moduł silnika,
- Moduł przesuwny,
- Moduł zamykający,
- Sprzęgło siły trzymania z suwakiem nastawczym,
- Płyta podstawy,

Zwrotnica:

- Iglice rozjazdu,
- Szyny oporowe,
- Klamry zamknięcia,
- Prowadnice klamer,
- Suwakowy drążek nastawczy.

Pozostałe elementy pominięto jako nieistotne dla badań symulacyjnych (nie wpływają na siłę przestawiania), a które niepotrzebnie komplikowałyby model i utrudniłyby symulację.

4.1.1 Określenie podstawowych parametrów modelu

Przeprowadzono analizę następujących elementów modelu układu napęd-rozjazd:

Siły tarcia przy przestawianiu

Podczas przestawiania zwrotnicy jedną z podstawowych sił oporowych dla napędu jest siła tarcia generowana pomiędzy iglicami a poduszkami iglicowymi, oraz generowana przez klamry zamknięć i drażek nastawczy w prowadnicach.

W samym napędzie opór generowany jest w module zamykającym podczas wciskania blokady oraz w czasie ruchu suwaka nastawczego w łożyskach ślizgowych.

Bezwładność elementów ruchomych

Przyjęto, że bezwładność elementów ruchomych ma znikomy wpływ na siły generowane w napędzie i został on pominięty przy analizie.

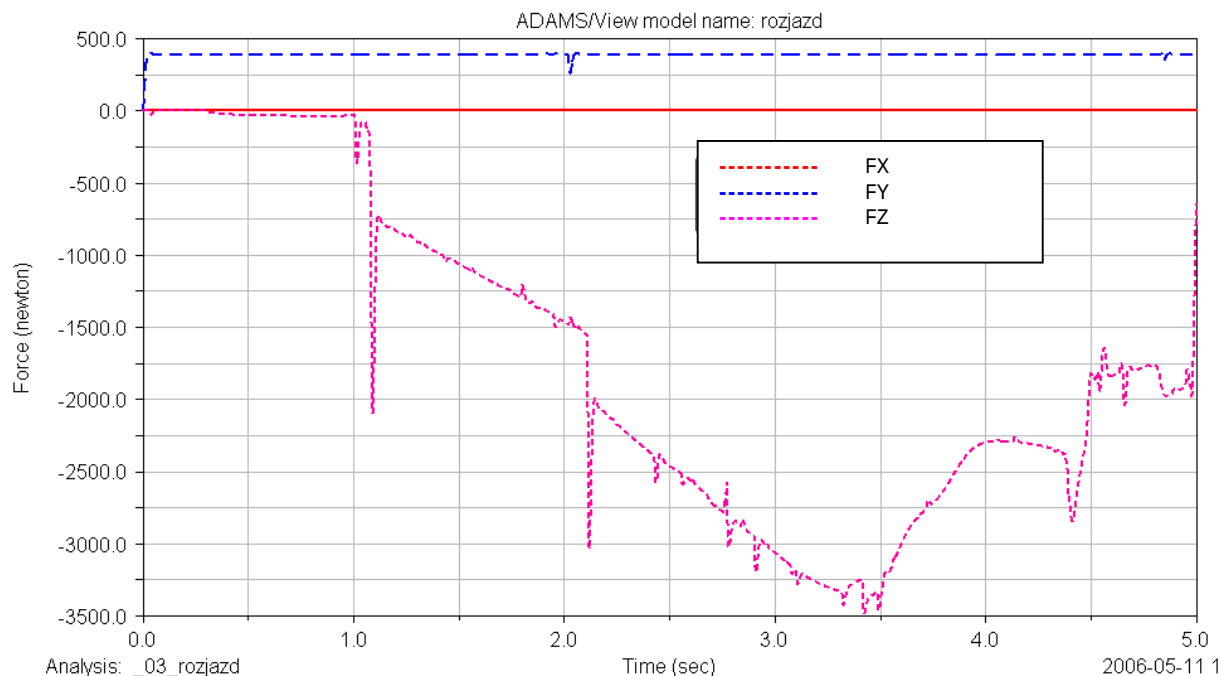
Wartość sprężystości iglic

Analizowana zwrotnica posiada iglice sprężyste. Dlatego w celu określenia wartości siły potrzebnej do ugięcia iglicy o określoną wartość, wyliczono na podstawie momentów bezwładności odpowiednich przekrojów.

4.2. Wyniki symulacji

4.2.1 Przesławianie zwrotnicy napędem zwrotnicowym

Jako rezultat przeprowadzonej symulacji otrzymano wykres siły oporów przesławiania mierzony na suwaku nastawczym napędu w trakcie przesławiania zwrotnicy. Otrzymany przebieg przedstawiony jest na rysunku 47. Maksymalna siła oporów wyniosła ok. 3,5kN. Jest to wartość porównywalna z maksymalnymi oporami dla tego typu zwrotnicy określonej przez producenta w warunkach technicznych wykonania i odbioru [82],[83]. Wartość ta w trakcie odbioru technicznego nie powinna przekraczać w eksploatacji 4,1kN.



Rys. 47. Wykres siły oporów przestawiania mierzony na suwaku nastawczym napędu w trakcie przestawiania zwrotnicy (wynik symulacji).

Biorąc pod uwagę opisaną wcześniej zasadę działania napędu zwrotnicowego EEA-5 oraz zwrotnicę z suwakowym zamknięciem, proces przestawiania układu można podzielić na następujące fazy przestawiania:

Faza I

Nakrętka śruby kulowej za pomocą liniału wciska blokadę modułu zamykającego. W wyniku, czego następuje odblokowanie suwaka nastawczego napędu. W tym momencie zostają przełączone wyłączniki krańcowe modułu sterująco-kontrolnego i zostaje przekazany sygnał utraty kontroli do systemu sterującego.

Moduł przesuwany przesuwa się o 57mm.

Czas trwania 0,98sek.

Zakończanie tej fazy powoduje początek przestawiania suwaka nastawczego napędu.

Faza II

Obie blokady w napędzie są wciśnięte do modułu zamykającego. Suwak w napędzie przesuwa się na drodze ≈ 60 mm. W tej fazie odbywa się przemieszczanie iglicy odlegającej (1) oraz otwarcie zamka iglicy dolegającej (2).

Czas trwania 1,03sek.

Faza III

Obie iglice i suwak napędu przemieszczają się o 100mm. Czas trwania 1,71sek.

Iglica 1 kończy przestawianie.

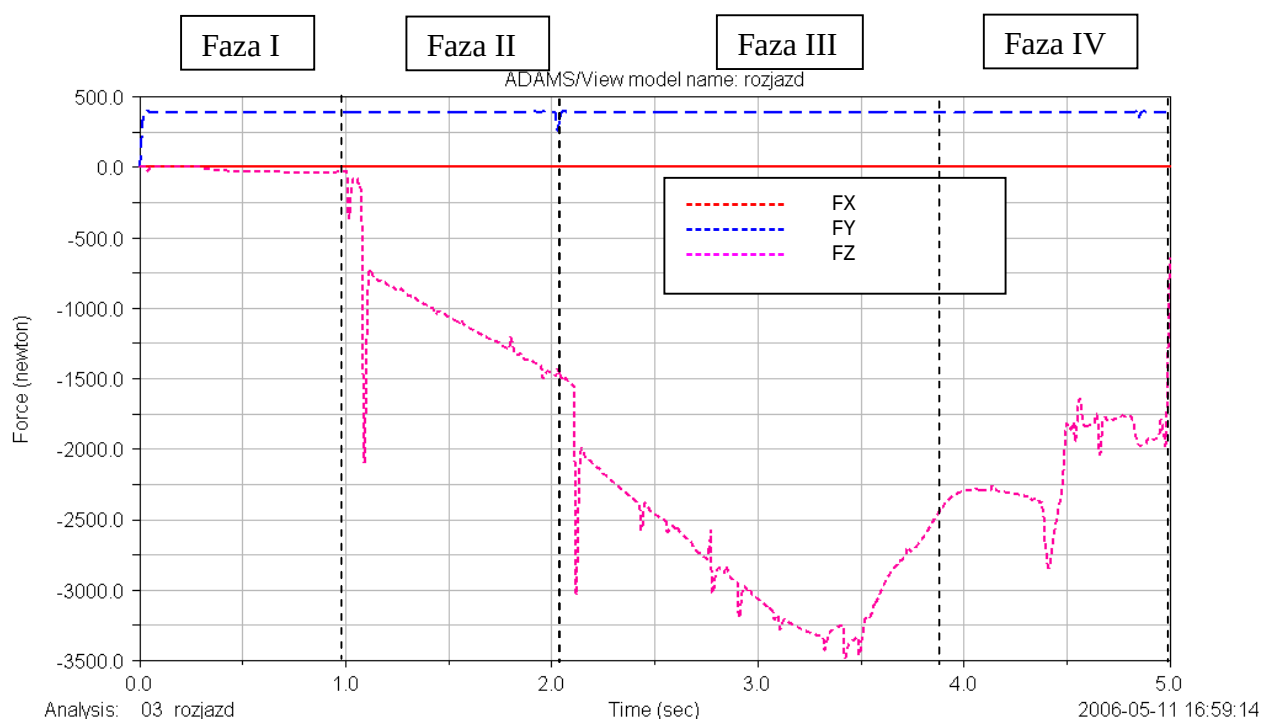
Faza IV

Iglica 2 i suwak napędu przemieszczają się o 60mm. Czas trwania 1,03sek.

W tym czasie następuje zamknięcie zamka suwakowego. Zakończenie całego przestawiania poprzez blokadę w napędzie.

W sumie daje to teoretyczny czas przestawiania 4,75sek. Czas przestawiania napędu zgodnie z dokumentacją wynosi 5 sek. [15]

Na podstawie wyznaczonych powyżej czasów, wyodrębnione fazy zaznaczono na rysunku 48.



Rys. 48. Wyodrębnione fazy przestawiania układu napęd-rozjazd.

Pierwsza faza dotyczy otwarcia napędu zwrotnicowego jeszcze zanim ruszy suwak nastawczy napędu i w związku z tym siła w oczku suwaka wynosi zero. Pozostałe

trzy faz dotyczą przestawiania zwrotnicy z zamknięciem i odpowiadają fazom działania zamknięcia suwakowego. W fazie drugiej obserwujemy wzrost oporów przestawiania spowodowany przestawianiem iglicy odlegającej oraz otwieraniem zamknięcia iglicy dolegającej. W fazie trzeciej przemieszczają się obie iglice i na jej zakończenie jedna iglica kończy przestawianie. W ostatniej fazie następuje dokończenie przestawiania drugiej iglicy oraz zaryglowanie pierwszej.

4.2.2 Symulacje działania układu z wybranymi możliwymi usterkami

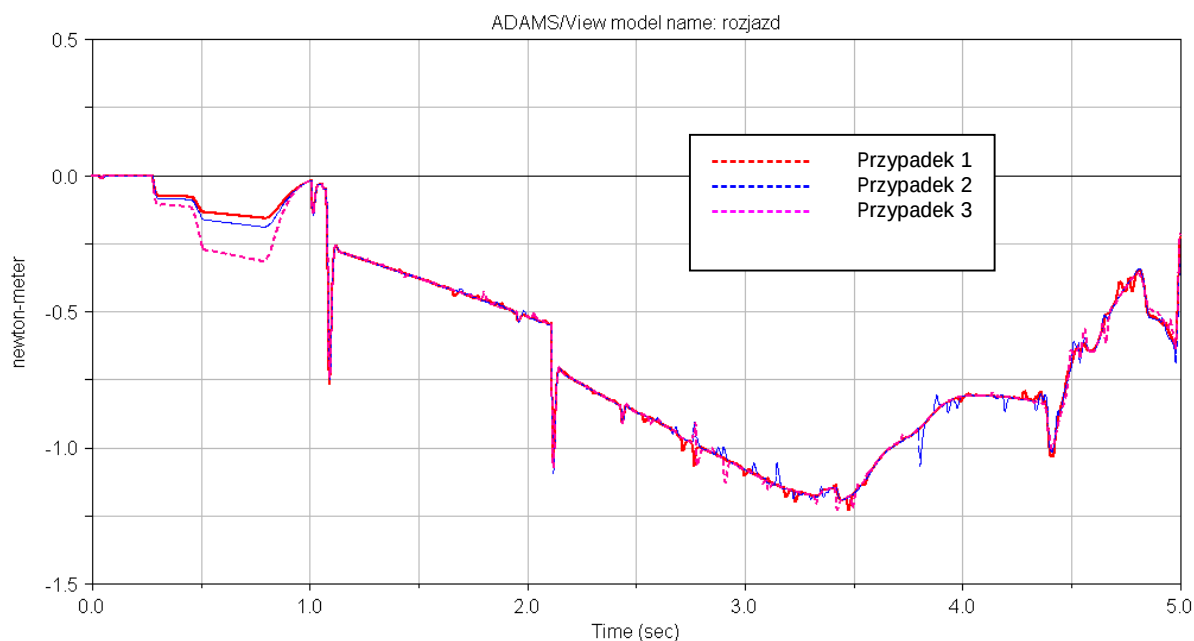
Aby określić wpływ niesprawności na zachowanie układu przeprowadzono szereg analizy w różnych wariantach dla każdej niesprawności indywidualnie. Warianty przyjęto na podstawie konsultacji z ekspertami producenta analizowanego napędu. Dla każdego wariantu przeprowadzono kilka analiz przy innej wartości odpowiedniej zmiennej. Rodzaj wybranej zmiennej i ich wartości dla poszczególnych analiz przedstawiono w tabeli 1. Parametry dobrano tak, aby dotyczyły symulowanych usterek napędu zwrotnicowego oraz zwrotnicy.

Jako rezultat przeprowadzonej symulacji otrzymano wykres siły oporów przestawiania mierzony na suwaku nastawczym napędu w trakcie przestawiania zwrotnicy oraz wykres momentu napędowego w czasie przestawiania.

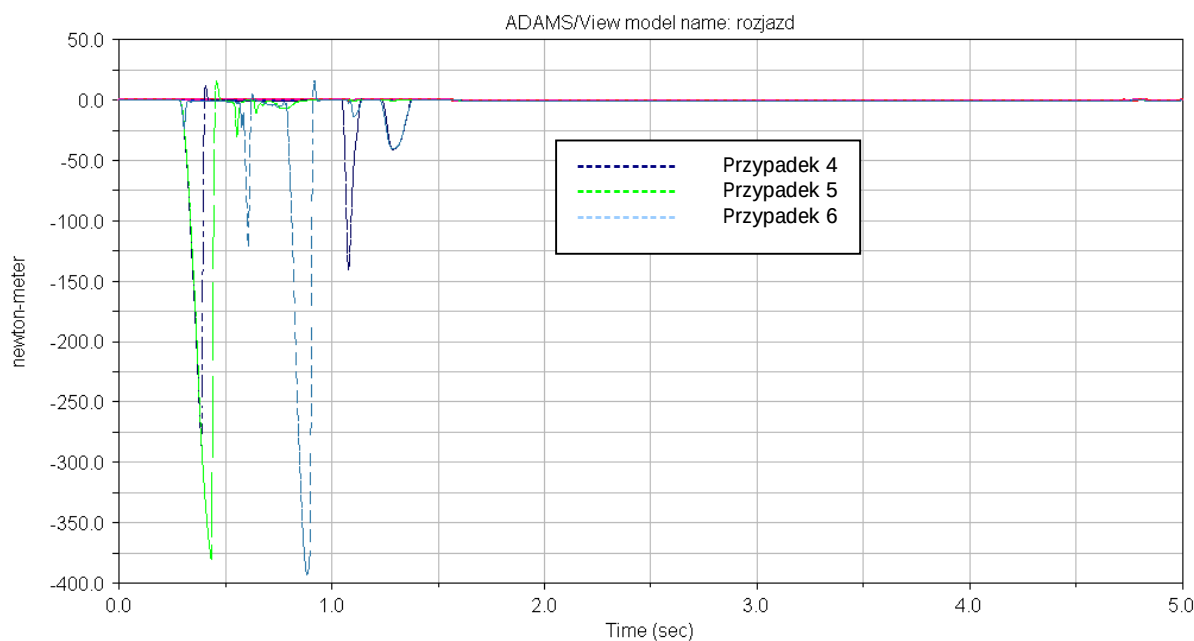
Otrzymane przebiegi przedstawiono na rysunkach od 49 do 72 [91]. Nie należy analizować ich pod kątem konkretnych wartości a jedynie jako potwierdzenie wpływu symulowanej niesprawności na zachowanie badanego układu.

Tabela 1. Warianty analiz modelu

Numer analizy	Rodzaj zmiennej	Wartość zmiennej	Wariant
1.	Współczynnik tarcia blokady modułu zamykającego	0.05	I
2.		0.1	
3.		0.2	
4.		0.3	
5.		0.4	
6.		0.5	
7.	Współczynnik tarcia w łożyskach suwaka nastawczego napędu	0.05	II
8.		0.1	
9.		0.2	
10.		0.3	
11.		0.4	
12.		0.5	
13.	Współczynnik tarcia w prowadzeniu liniału w napędzie	0.05	III
14.		0.1	
15.		0.2	
16.		0.3	
17.		0.4	
18.		0.5	
19.	Współczynnik tarcia w prowadzeniu drążka suwakowego zamknięcia	0.05	IV
20.		0.1	
21.		0.2	
22.		0.3	
23.		0.4	
24.		0.5	
25.	Współczynnik tarcia klamry zamknięcia iglicy drugiej	0.05	V
26.		0.1	
27.		0.2	
28.		0.3	
29.		0.4	
30.		0.5	
31.	Sztywność iglicy drugiej	10 N/mm	VI
32.		100 N/mm	
33.		1000 N/mm	
34.	Zmiana sztywności obu iglic	0.25*k	VII
35.		0.5*k	
36.		K	
37.		2*k	
38.		4*k	
39.	Współczynnik tarcia prowadzenia iglic	0.1	VIII
40.		0.2	
41.		0.3	
42.		0.4	
43.		0.5	
44.	Współczynnik tarcia klamry zamknięcia iglicy pierwszej	0.05	IX
45.		0.1	
46.		0.2	
47.		0.3	
48.		0.4	
49.		0.5	
50.	Sztywność iglicy pierwszej	10 N/mm	X
51.		100 N/mm	
52.		1000 N/mm	
53.	Zblokowanie iglicy drugiej przez działanie siły	500 N	XI
54.		1000 N	
55.		1500 N	
56.		2000 N	
57.		2500 N	
58.	Przestawienie geometrii drążka w stosunku do klamry	2 mm	XII
59.		4 mm	
60.		6 mm	
61.		8 mm	
62.		10 mm	

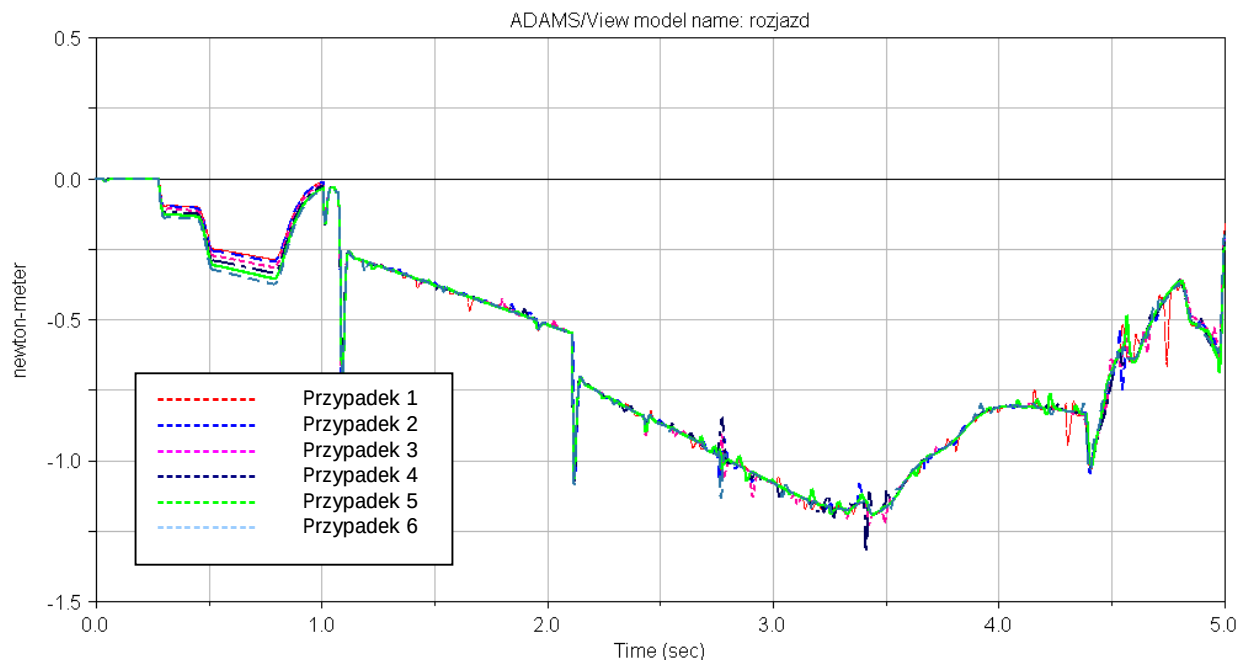
Wariant I - Zmiana współczynnika tarcia na blokadzie modułu zamykającego

Rys. 49. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant I dla przypadków 1,2 i 3.

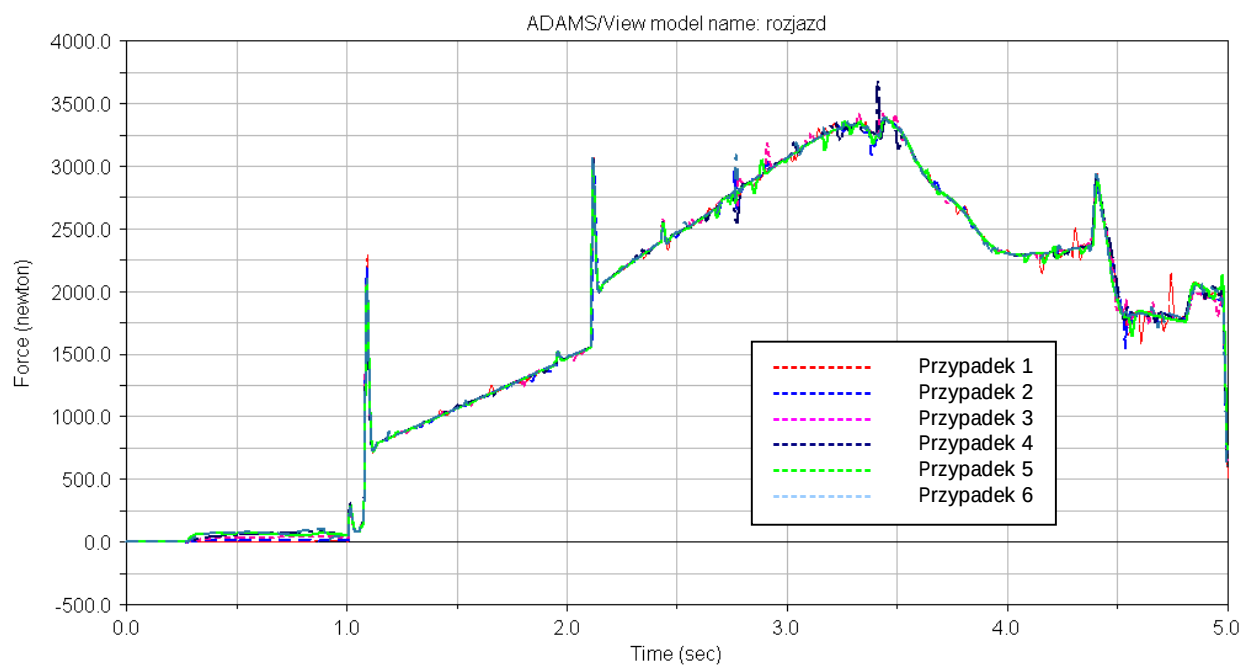


Rys. 50. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant I dla przypadków 4, 5 i 6.

Zmiana współczynnika tarcia na blokadzie modułu zamykającego widocznie wpływa na wartość momentu napędowego silnika tylko w pierwszej fazie przestawiania. Dla przypadków 4, 5 i 6 wzrost wartości współczynnika tarcia spowoduje zablokowanie napędu zwrotnicowego i przerwanie procesu przestawiania. Po przekroczeniu pewnej wartości współczynnika tarcia następuję wzrost wrażliwości układu. Na podstawie pomiaru tych wielkości można wykryć zmianę tego parametru.

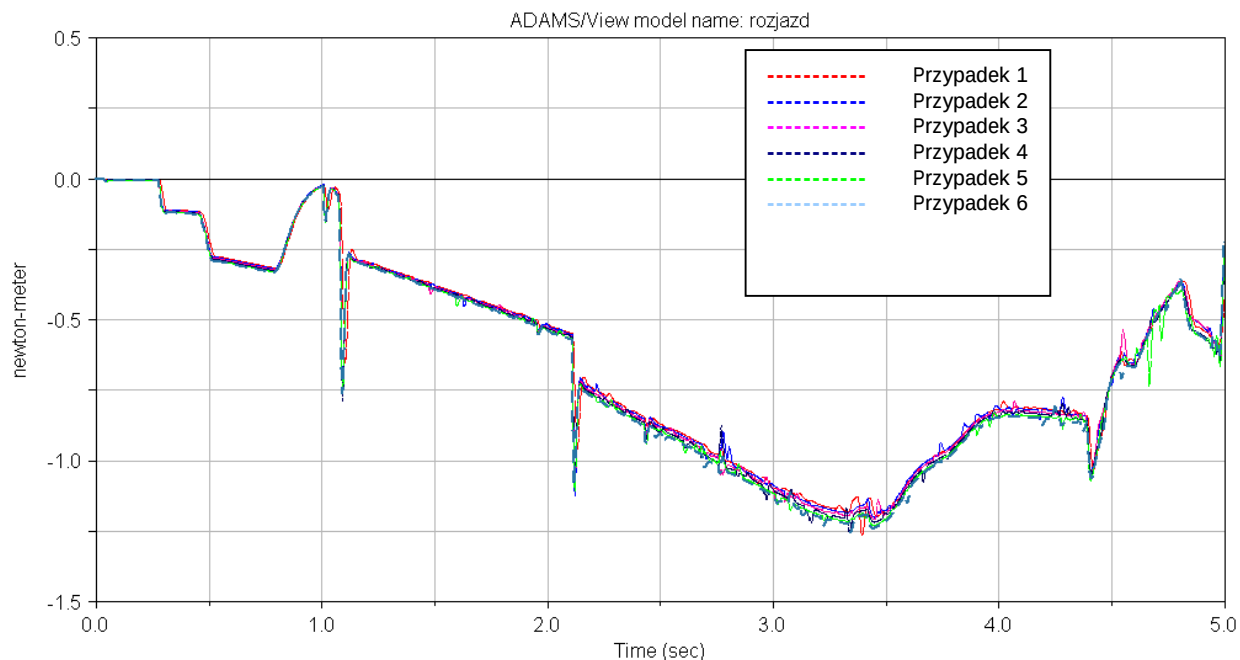
Wariant II – Zmiana współczynnika tarcia w łożyskach suwaka nastawczego

Rys. 51. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant II

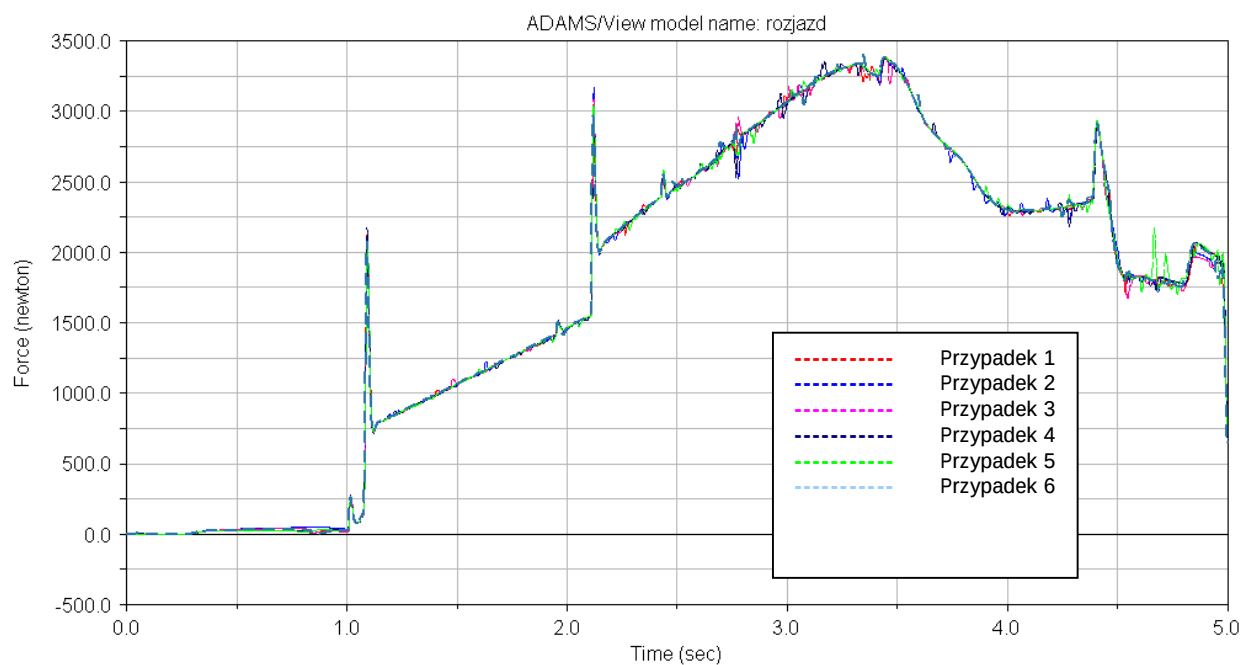


Rys. 52. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant II

Zmiana współczynnika tarcia w łożyskach suwaka nastawczego napędu nieznacznie wpływa na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu. Dodatkowo można zauważyć, że na wykresach siły mierzonej na suwaku nastawczym wartość jest równa 0 (zero) ze względu, na fakt, iż w tej fazie suwak się nie porusza i napęd nie oddziałuje na niego żadną siłą.

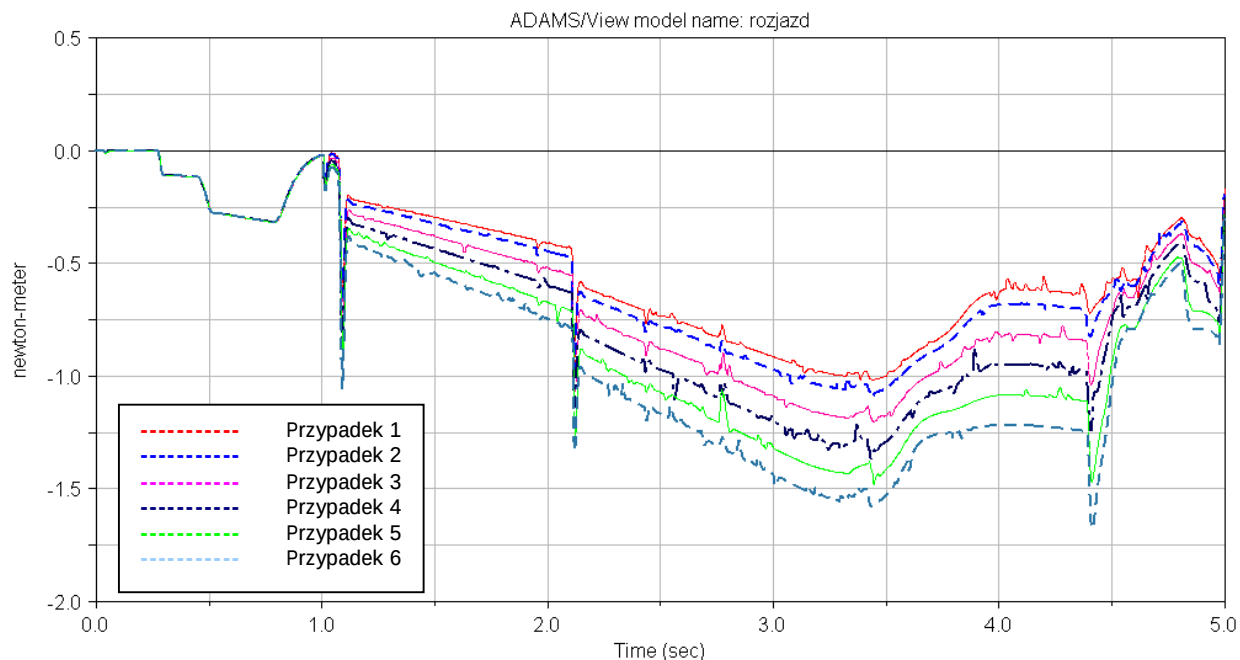
Wariant III – Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu liniału napędu

Rys. 53. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant III

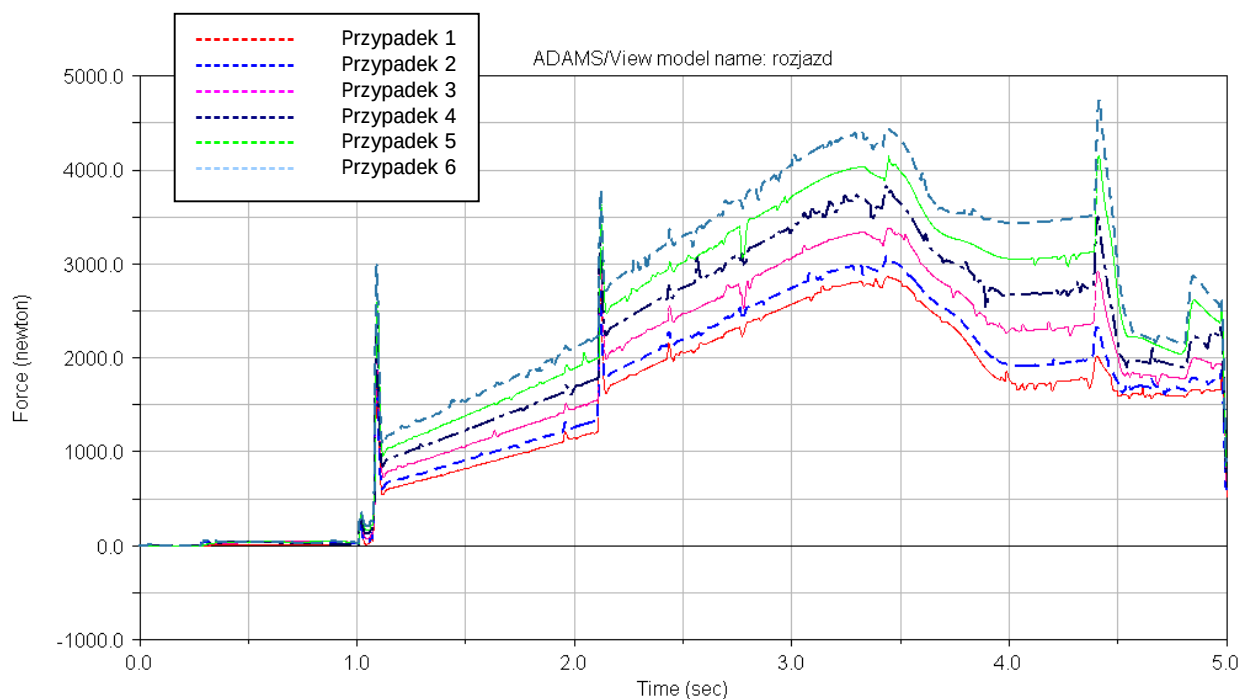


Rys. 54. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant III

Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu liniału nieznacznie wpływa na wartość na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu.

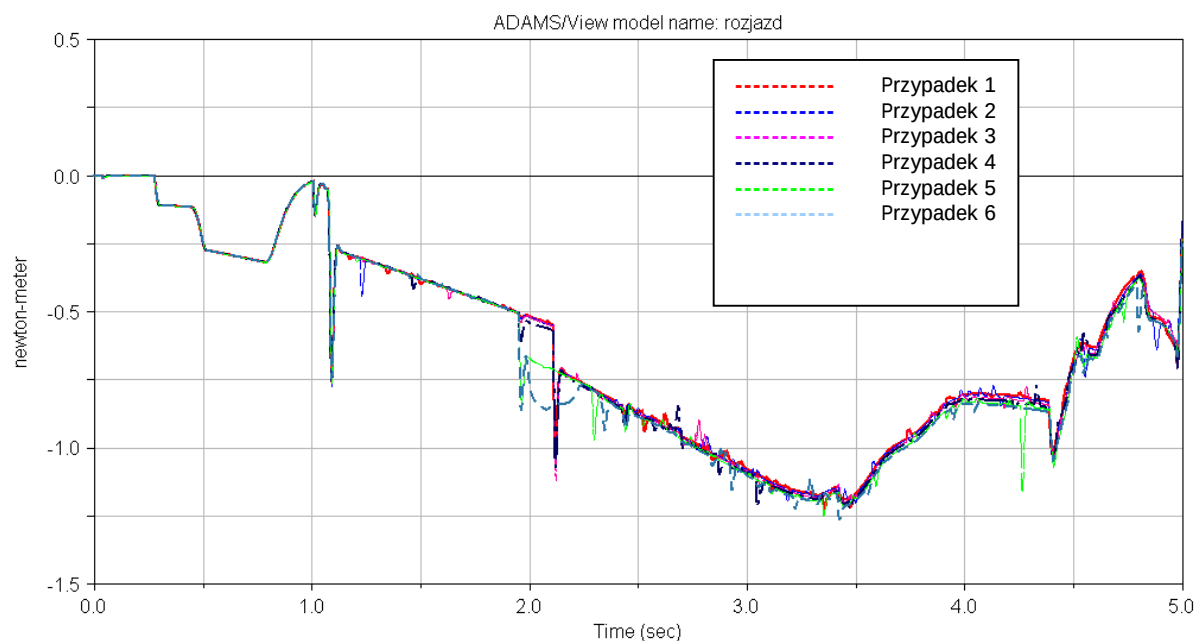
Wariant IV – Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu drążka suwakowego

Rys. 55. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant IV

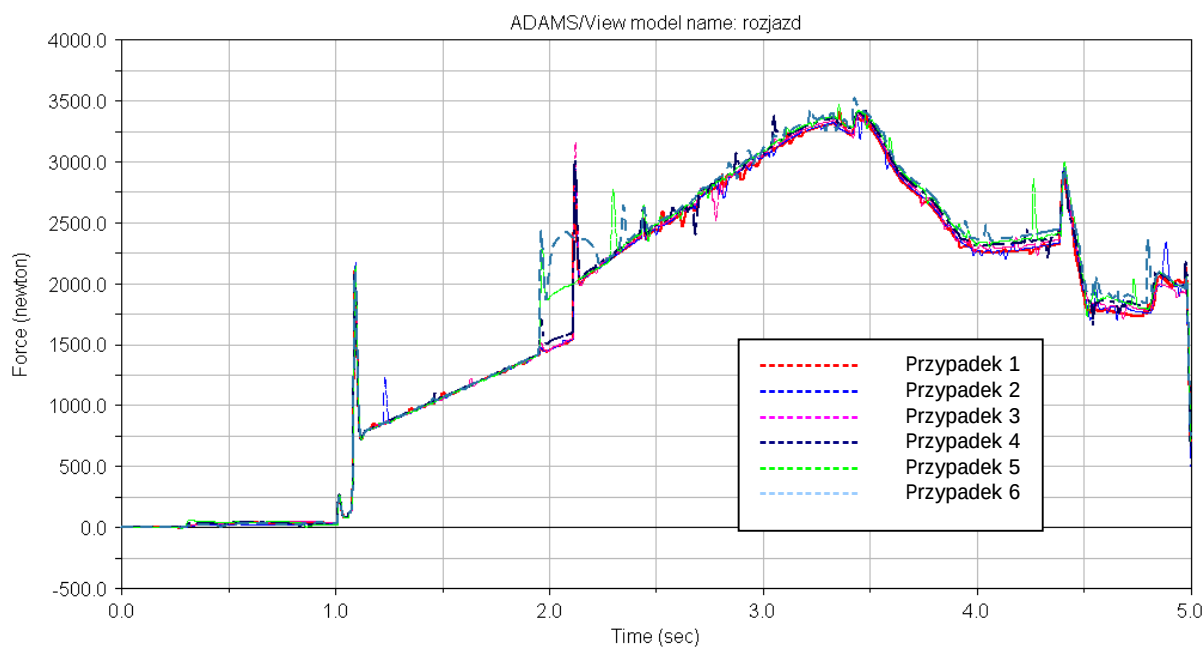


Rys. 56. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant IV

Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu drążka suwakowego zamknięcia ma wpływ na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu. Na podstawie pomiaru tych wielkości można wykrzyć zmianę tego parametru. Drążek porusza się w tym samym czasie i o taki sam skok, co suwak nastawczy napędu.

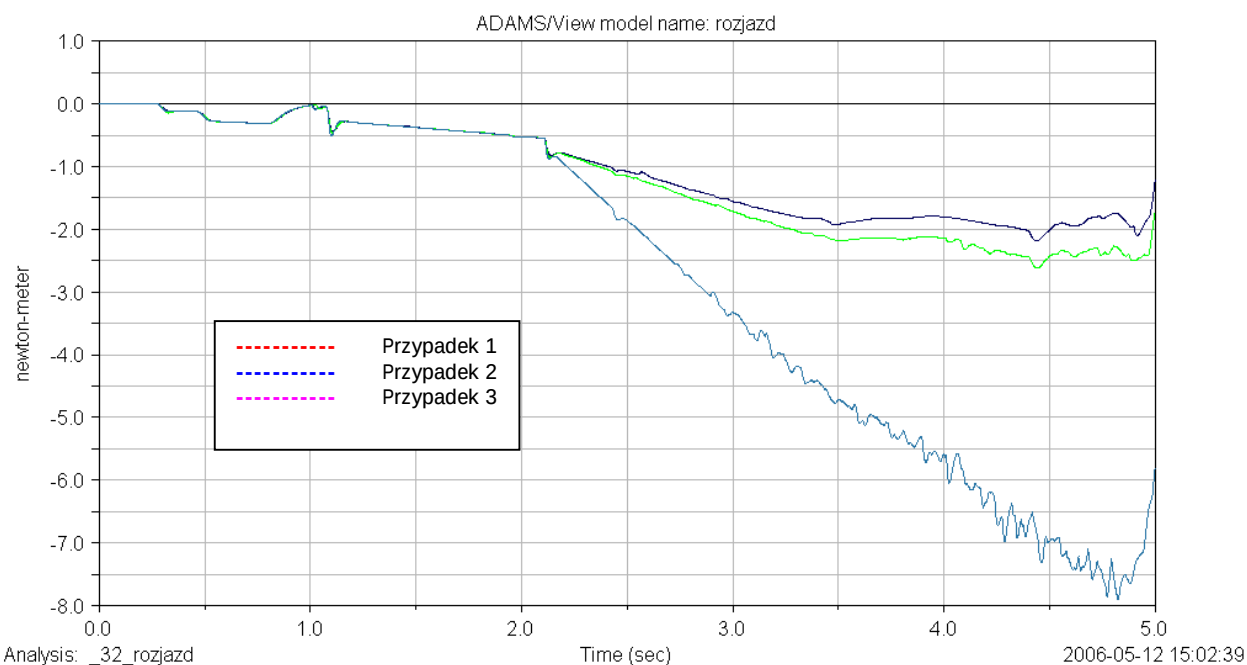
Wariant V – Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu klamry iglicy drugiej

Rys. 57. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant V

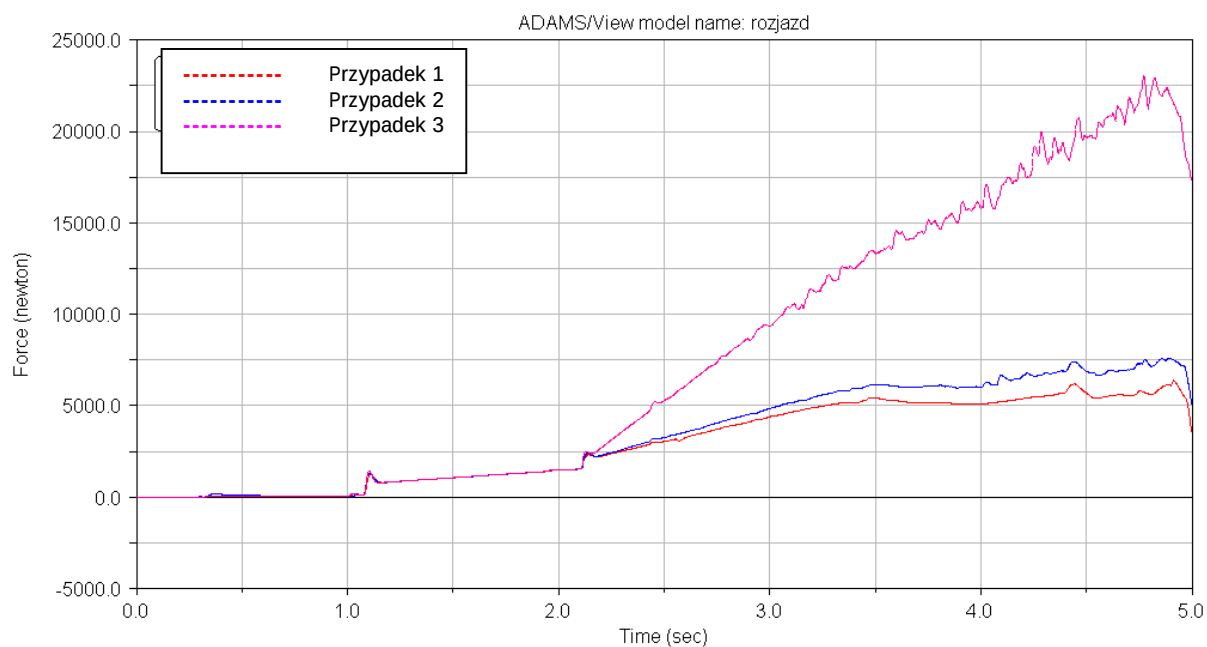


Rys. 58. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant V

Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu klamry zamknięcia nieznacznie wpływa na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu.

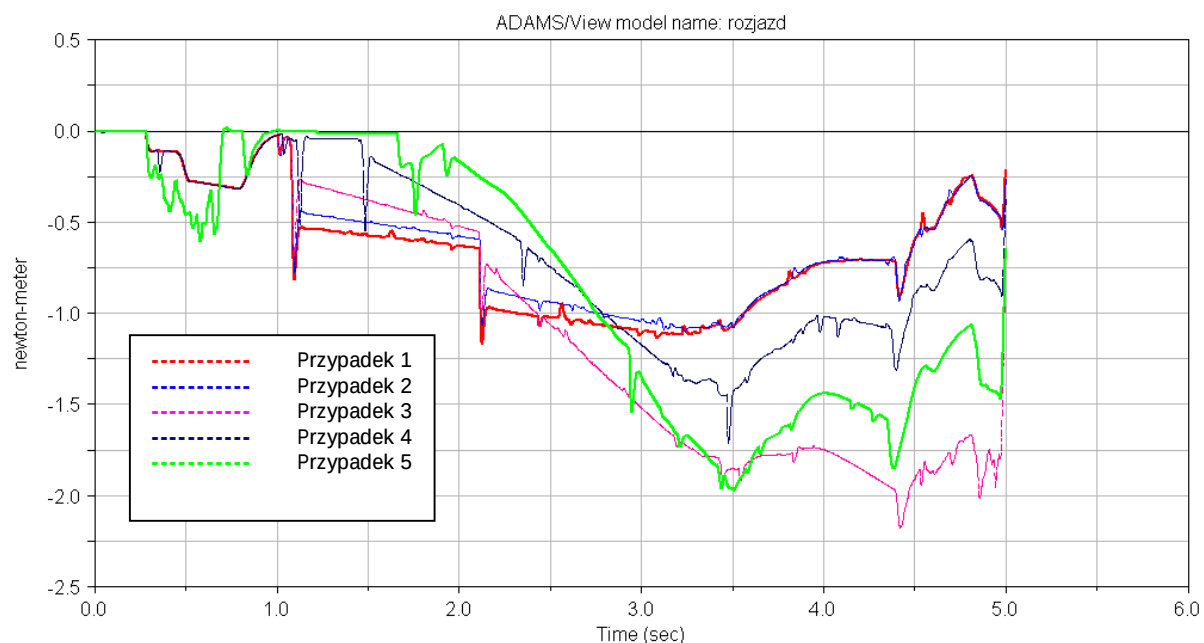
Wariant VI – Symulacja zablokowania iglicy drugiej

Rys. 59. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant VI

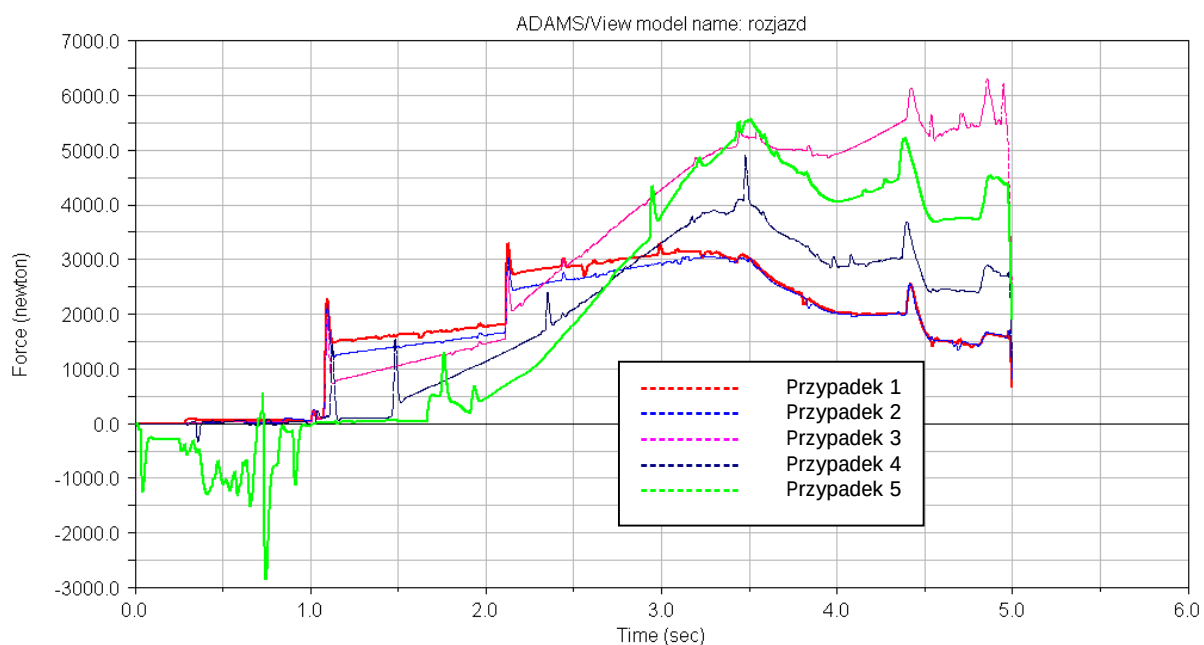


Rys. 60. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant VI

Zablokowanie iglicy powoduje duży wzrost oporów przestawiania, przez co ma wpływ na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu. Na podstawie pomiaru tych wielkości można wykryć zmianę tego parametru. Iglica druga rozpoczyna ruch w 3 fazie i kończy ruch wraz z ruchem napędu.

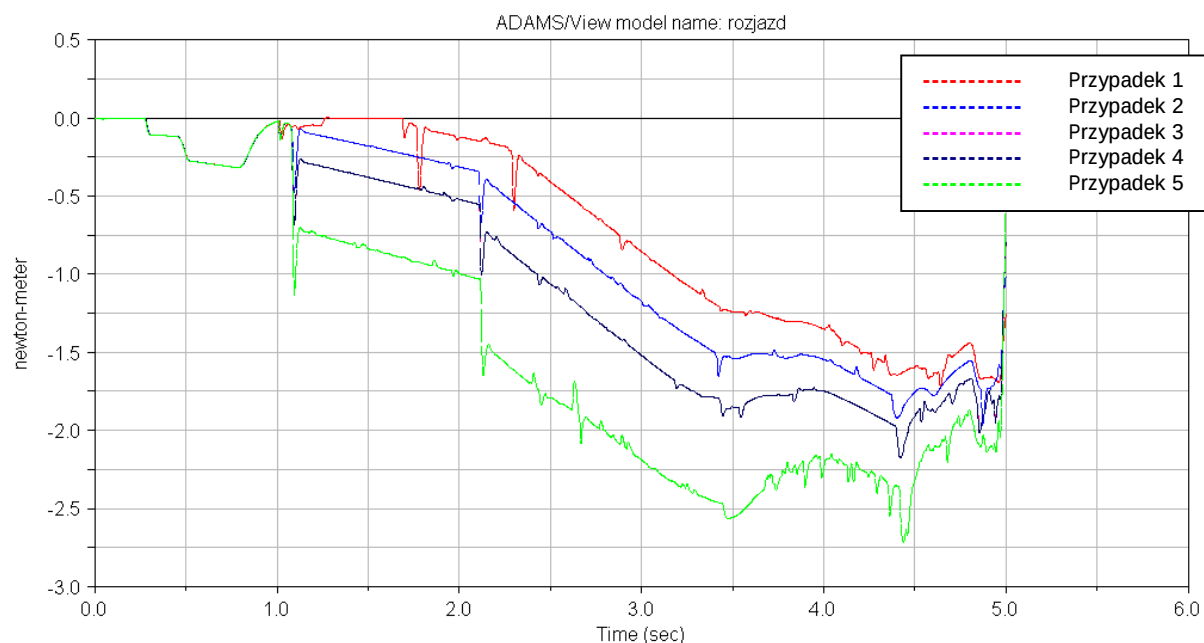
Wariant VII – Zmiana sztywności iglic

Rys. 61. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant VII

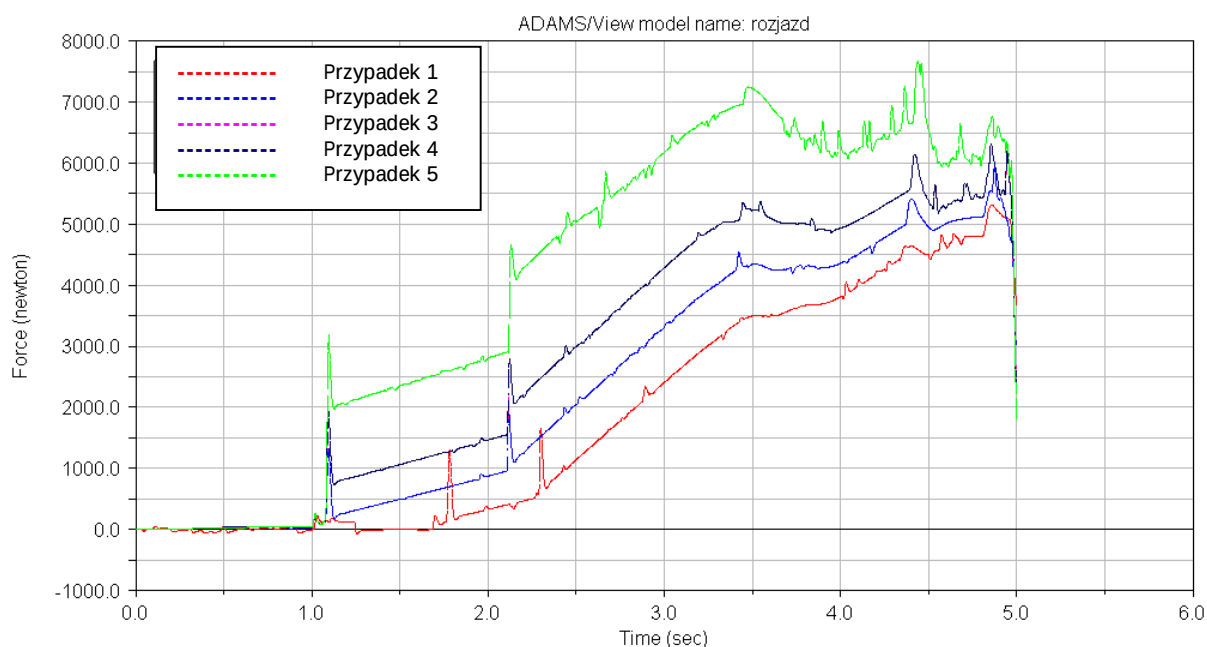


Rys. 62. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant VII

Zmiana sztywności iglic ma znaczący wpływ na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu. Jednak trudno jest w sposób jednoznaczny zinterpretować otrzymane przebiegi. W dalszych rozważaniach wariant ten zostanie pominięty.

Wariant VIII – Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu iglic

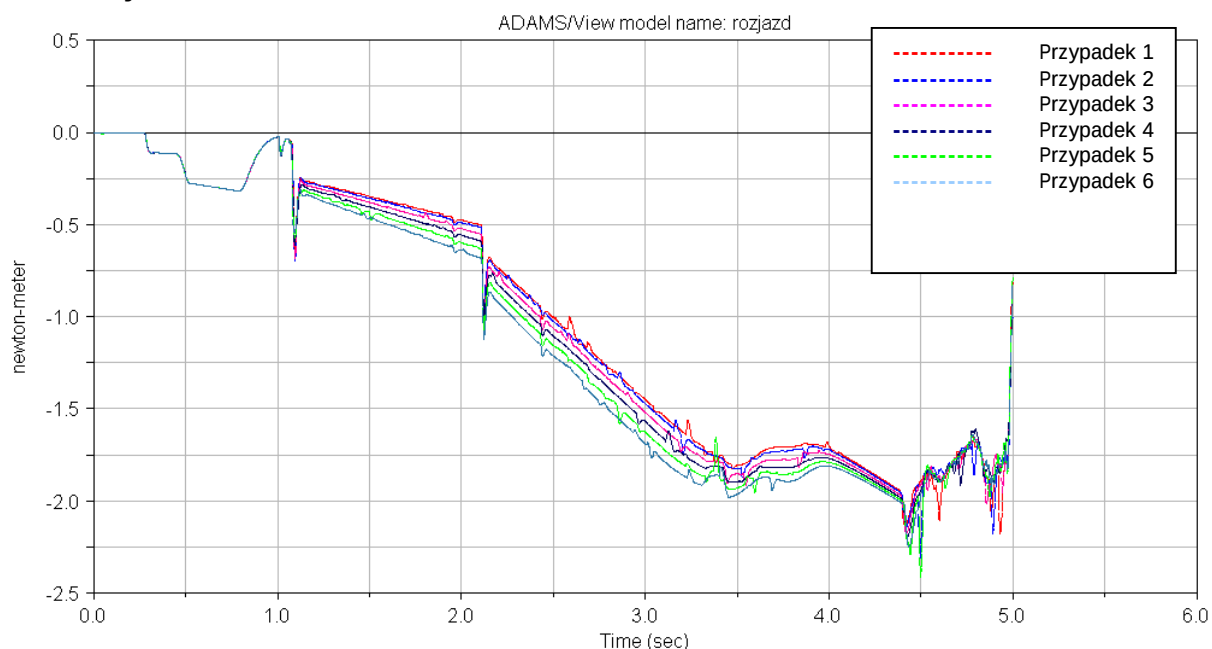
Rys. 63. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant VIII



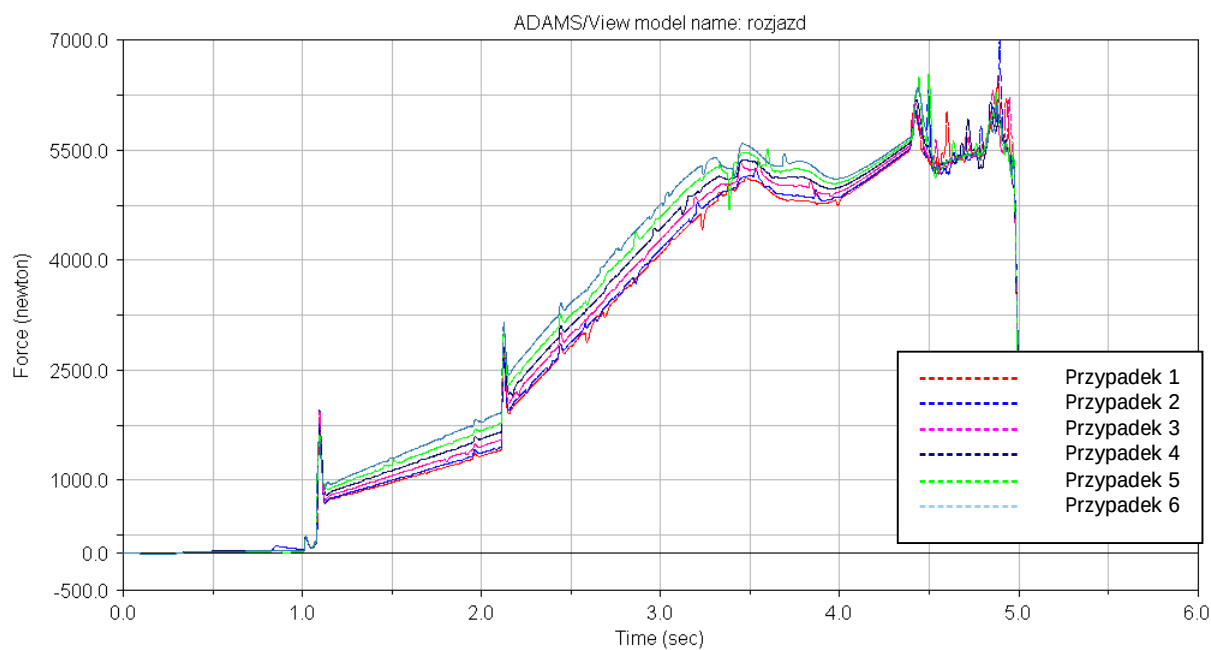
Rys. 64. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant VIII

Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu iglic ma znaczący wpływ na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu. Na podstawie pomiaru tych wielkości można wykryć zmianę tego parametru.

Wariant IX – Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu kłamy iglicy pierwszej

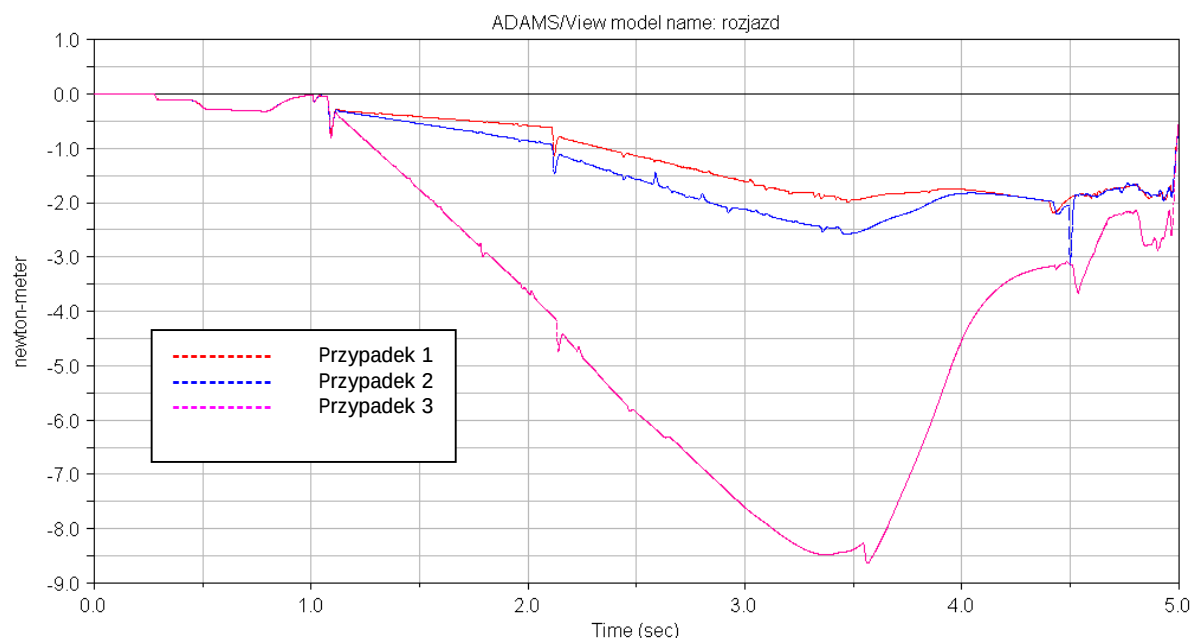


Rys. 65. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant IX

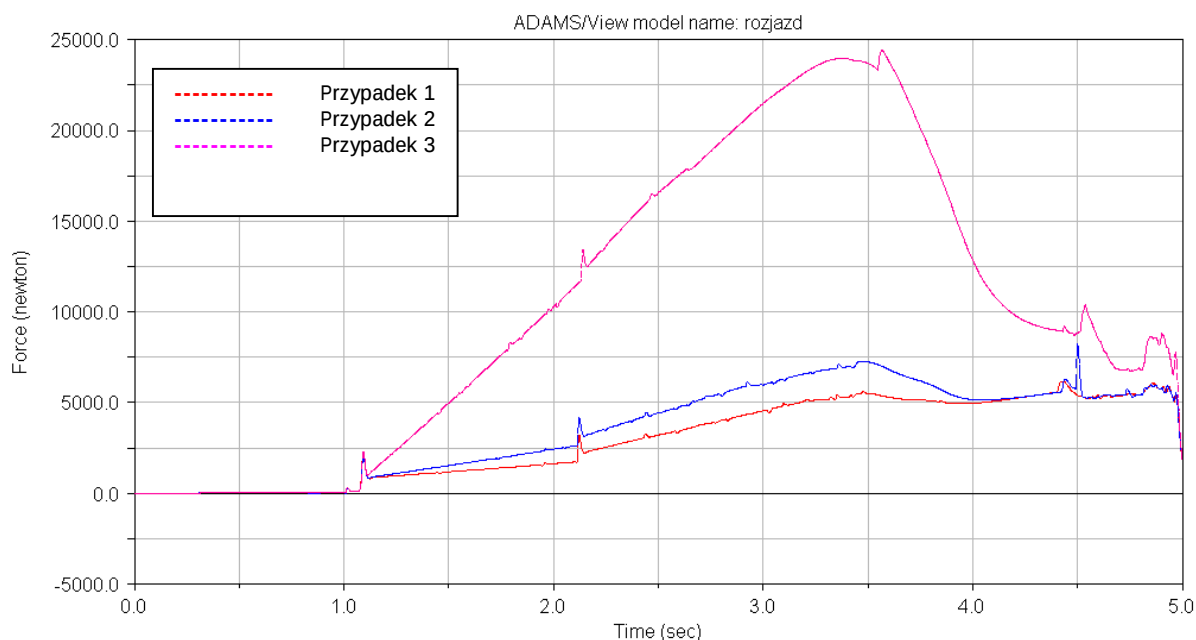


Rys. 66. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant IX

Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu kłamy zamknięcia wpływa na wartość na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu.

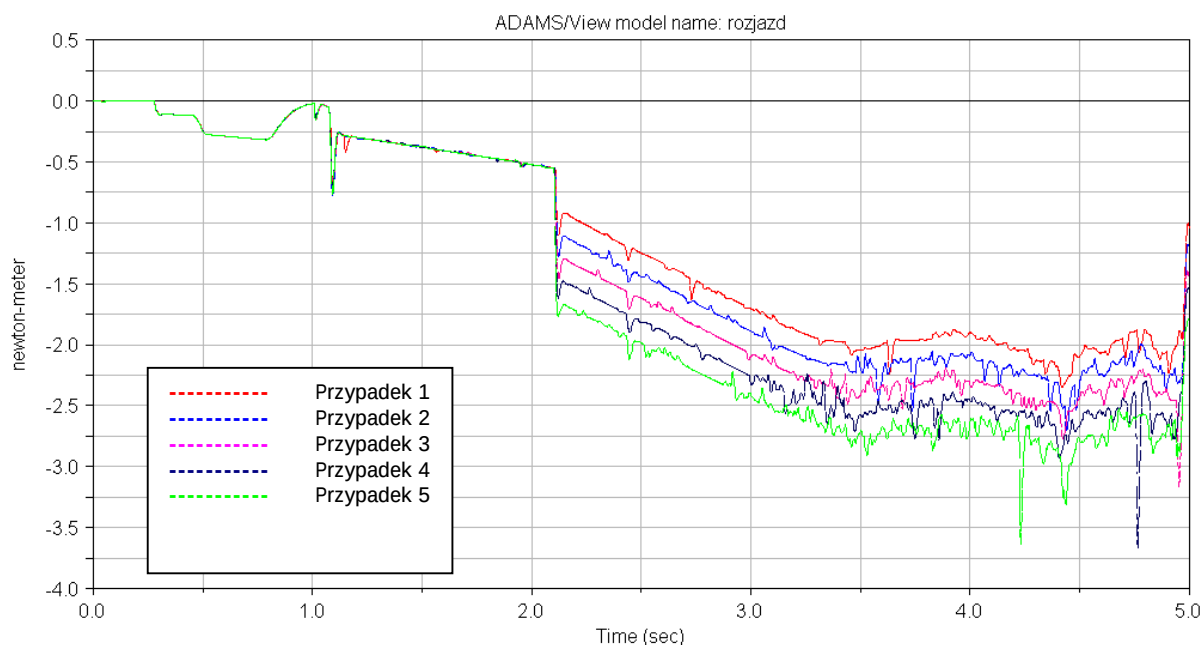
Wariant X – Symulacja zblokowania iglicy pierwszej

Rys. 67. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant X

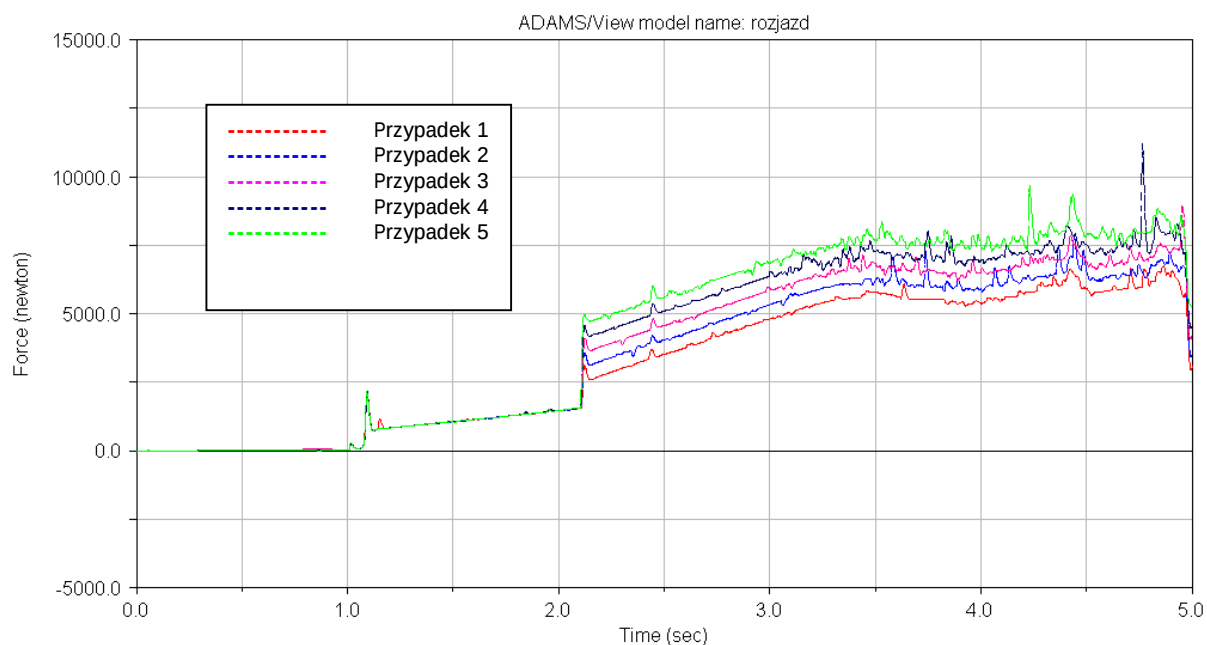


Rys. 68. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant X

Tak jak w poprzednim przypadku, zablokowanie iglicy powoduje duży wzrost oporów przestawiania, przez co ma wpływ na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu. Na podstawie pomiaru tych wielkości można wykryć zmianę tego parametru. Iglica pierwsza rozpoczyna ruch w 2 fazie i kończy ruch w 3.

Wariant XI – zablokowanie iglicy drugiej przez działanie siły

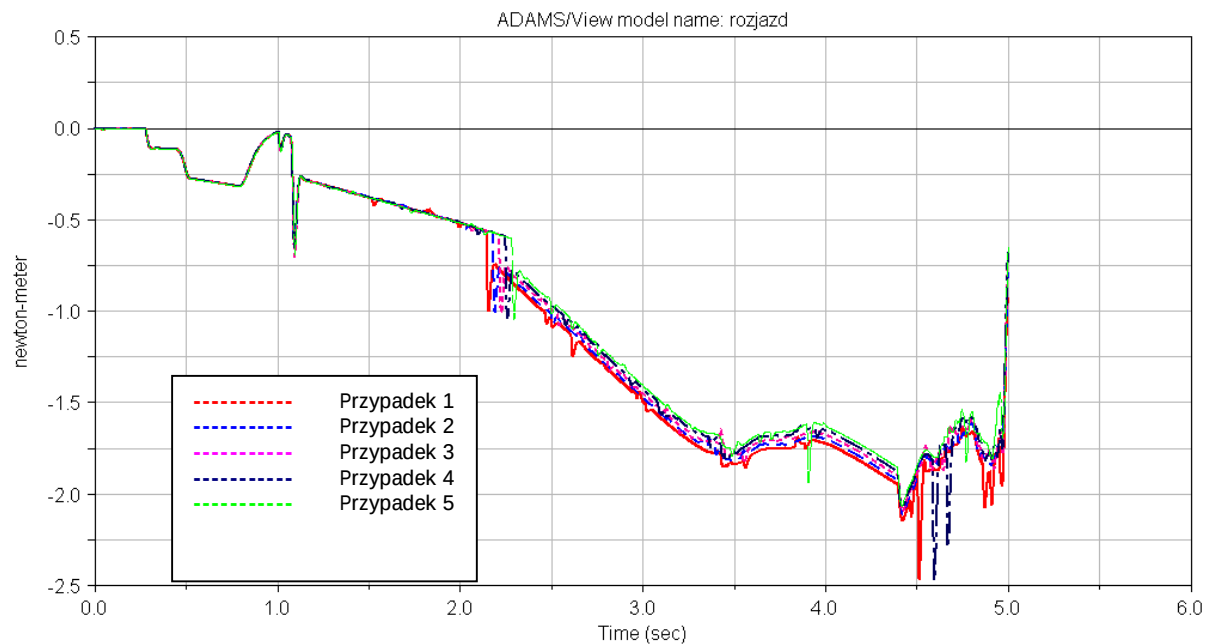
Rys. 69. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant XI



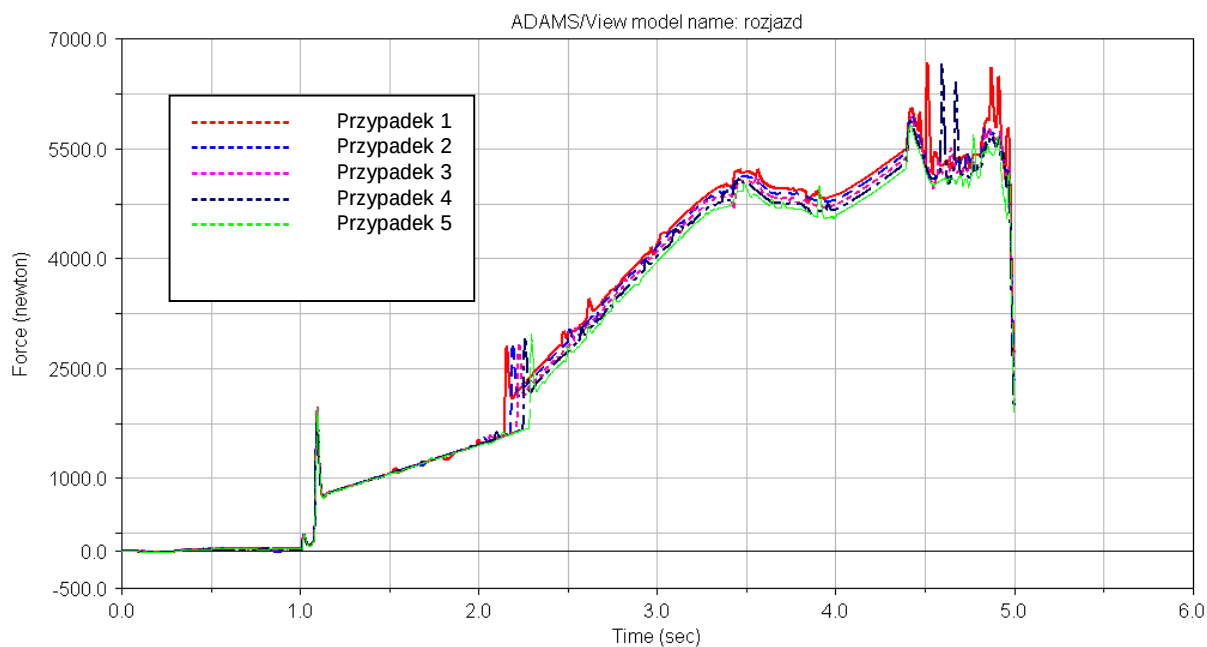
Rys. 70. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant XI

Zablokowanie iglicy drugiej powoduje duży wzrost oporów przestawiania, przez co ma wpływ na wartość momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu. Na podstawie pomiaru tych wielkości można wykryć zmianę tego parametru.

Wariant XII – zmiana geometrii w układzie drążek - kłamra



Rys. 71. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant XII



Rys. 72. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant XII

Zmiana geometrii w układzie drążek – kłamra wpływa na wartość i charakter przebiegu (zwłaszcza w ostatniej fazie ruchu) momentu napędowego silnika oraz siły oporów przestawiania mierzonej na suwaku nastawczym napędu.

4.3. Wnioski dotyczące symulacji

Na podstawie wyników przeprowadzonych symulacji modelu wielobryłowego zwrotnicy UIC 60 1:9 R300 przestawianej napędem zwrotnicowym typu EEA-5 można stwierdzić, iż monitorowanie siły oporów przestawiania zwrotnicy lub momentu napędowego napędu w funkcji czasu może posłużyć jako symptom diagnostyczny na potrzeby systemu monitorowania i diagnostyki stanu technicznego układu napęd-rozjazd.

Na podstawie tych parametrów możemy wykryć niesprawności dotyczące blokady modułu zamykającego w napędzie zwrotnicowym, pogarszający się stan techniczny zwrotnicy poprzez blokowanie iglic, zwiększone opory prowadzenia iglic na poduszkach oraz prowadzeniu drążka suwakowego.

Największy wzrost sił napędowych oraz momentu na silniku występuje, co jest zrozumiałe dla przypadków zablokowania układu poprzez zablokowanie iglic, zgodnie z wariantami VI i X.

W przypadku wzrostu tarcia w prowadzeniu blokady modułu zamykającego napędu występuje blokowanie się całości napędu i niekontrolowany wzrost sił napędowych – zgodnie z wariantem I.

Wyniki te wskazują na możliwość wykorzystania sił przestawiania do celów oceny stanu napędu i rozjazdu.

W kolejnych rozdziałach pracy przedstawiono koncepcję monitorowania tych sił.

5. Eksperymentalne badanie dynamiki układu napęd – zwrotnica.

Obecnie dostępnymi informacjami diagnostycznymi możliwymi do pozyskania w trakcie pracy napędu zwrotnicowego w zależności od systemu zależnościowego są tylko: informacje o czasie przestawiania napędu i/lub wartość prądu pobieranego przez silnik. Dlatego dla wyznaczenia przebiegu siły oporów przestawiania w funkcji czasu lub drogi suwaka nastawczego opracowano specjalny układ pomiarowy umożliwiający pomiar generowanej siły nastawczej. Układ ten na podstawie zmierzonej wartości chwilowej mocy czynnej pobieranej przez silnik napędu, wykorzystując model matematyczny napędu wyznacza siłę nastawczą potrzebną do pokonania oporów przestawiania.

5.1. Układ pomiarowy siły nastawczej

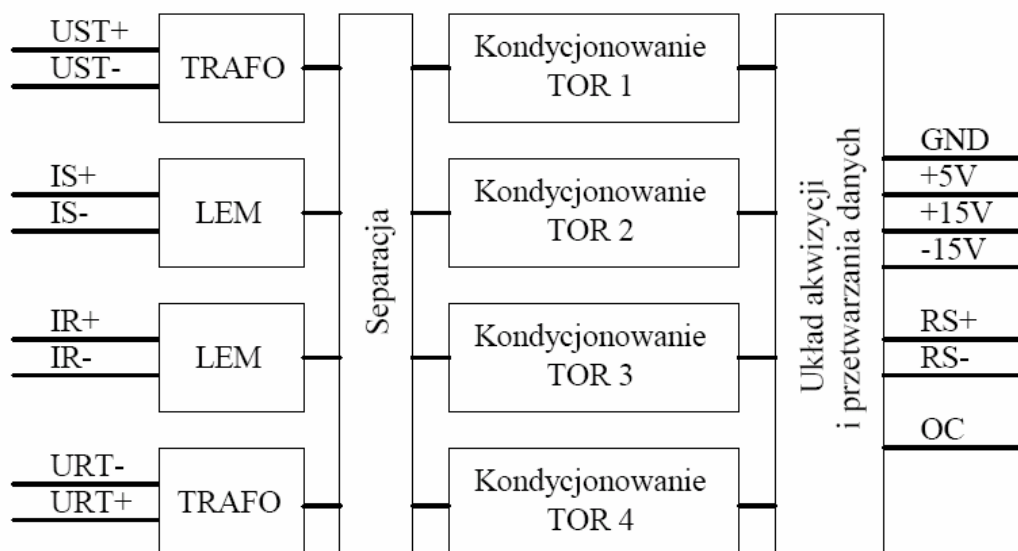
Opracowany moduł pomiarowy zawiera:

- Moduł pomiarowy
- Oprogramowanie realizujące estymację parametrów siły nastawczej

Moduł pomiarowy na podstawie danych pomiarowych estymuje funkcję siły na suwaku napędu zwrotnicowego względem drogi i czasu. Estymowany przebieg otrzymywany jest w wyniku symulacji modelu matematycznego napędu zwrotnicowego. Do obliczeń wykorzystywane są zarejestrowane przez moduł napięcia i prądy z układu Arona. Pomiary wykonywane są po stronie zasilania sterownika trójfazowego silnika indukcyjnego.

Schemat blokowy modułu przedstawiono na rysunku 73. Moduł składa się z:

- układu zasilania,
- czterech obwodów wejściowych,
- czterech torów kondycjonowania,
- układu akwizycji i przetwarzania danych,
- interfejsu komunikacyjnego



Rys. 73. Schemat blokowy modułu pomiarowego EKD-1

Oprogramowanie do estymacji parametru siły nastawczej

Program sterujący nadzoruje proces pomiarowy czterech wielkości analogowych.

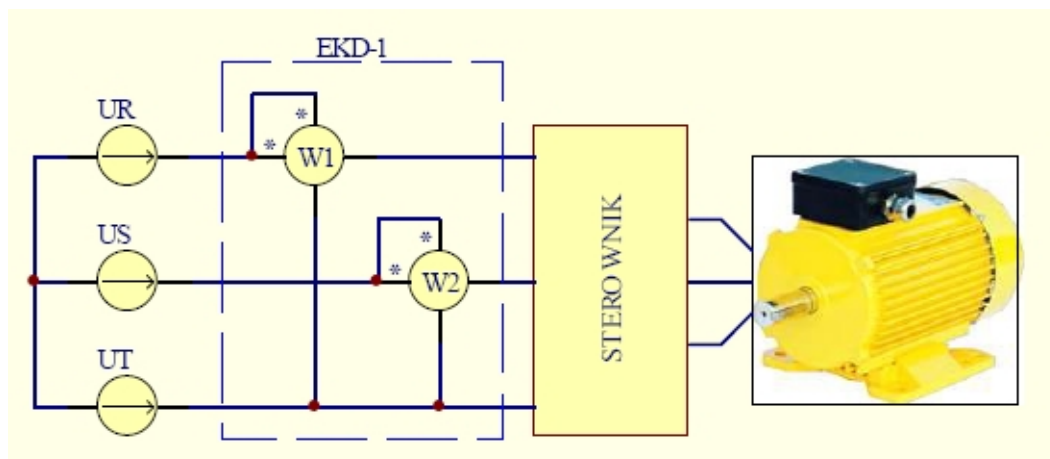
Proces pomiarowy składa się z następujących etapów:

- akwizycja (z podwójnym buforowaniem) próbek sygnałów z częstotliwością 5kHz,
- wykrycie wartości prądu jednej fazy przekraczającej 5% wartości nominalnej,
- akwizycja danych przez czas równy osiem sekund (plus jedna sekunda przed wykryciem progu),
- wyznaczenie mocy czynnej na podstawie zarejestrowanych przebiegów,
- filtracja uzyskanych wyników,
- wyznaczenie wielkości pożądanych (funkcja siły na suwaku zwrotnicy od drogi i czasu),
- wyznaczenie wartości maksymalnych w określonych przedziałach (na podstawie drogi dla etapów przesuwania zwrotnicy),
- przesłanie na żądanie zgromadzonych danych.

Wyniki w postaci przebiegu siły w funkcji przestawiania suwaka są wysyłane do komputera nadzorującego pracę systemu.

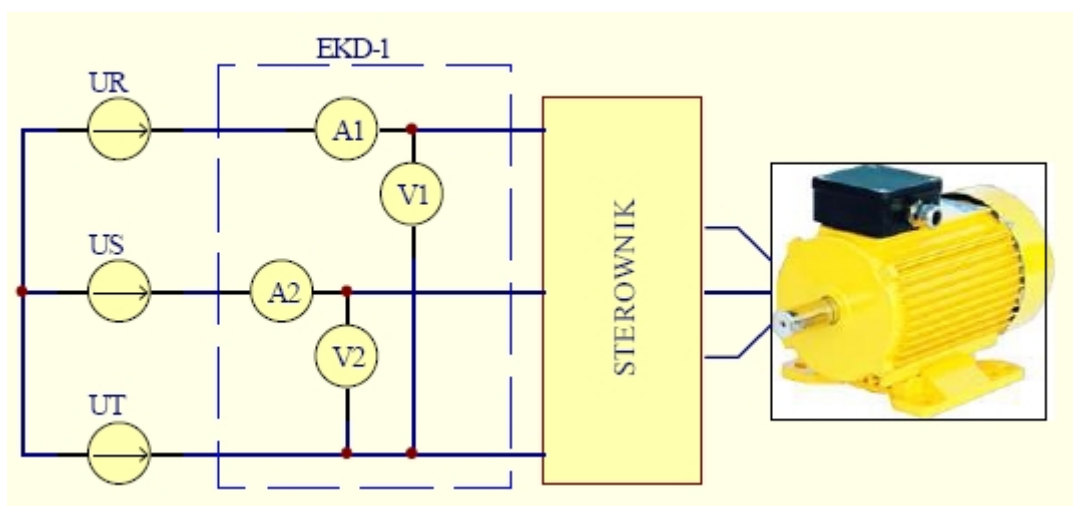
Podłączenie do sieci trójfazowej

Urządzenie jest przystosowane do pracy w układzie Arona (pomiar mocy czynnej). Na schemacie połączeń w sieci trójfazowej można go przedstawić jako układ dwóch watomierzy (rys. 74). Następnie każdy z watomierzy można oznaczyć jako amperomierz i woltomierz wartości chwilowych.



Rys. 74. Moduł EKD-1 pracujący w układzie Arona

Zasadę pomiaru oraz układ pomiaru mocy; niezbędnych danych dla wyznaczenia siły przestawiania, przedstawiono na rysunku 75.



Rys. 75. Moduł EKD-1 przedstawiony jako amperomierze i woltomierze

Na podstawie pomiarów wielkości elektrycznych dokonuje się estymacji siły nastawczej.

Algorytmy dla wyznaczenia przebiegu generowanej siły nastawczej w funkcji położenia suwaka nastawczego $F(x)$ w module pomiarowym opracowano w ramach zadania 4 w projekcie celowym nr 6 ZR9 2005 C/06688 [92].

5.2. Testy laboratoryjne modułu pomiarowego

Weryfikacja przyjętego sposobu pomiaru siły nastawczej

W laboratorium firmy Movares przeprowadzono testy modułu pomiarowego EKD-1, których celem było zbadanie poprawności przyjętej koncepcji pomiarów, algorytmów przetwarzania danych oraz wyznaczenie funkcji przejścia pomiędzy momentem obciążenia silnika M_m [kNm] a siłą F [kN] działającą na suwak w napędzie zwrotnicowym typu EEA-5 z silnikiem trójfazowym Sk120/72-4/185.

W tym celu wykonano serię 25 pomiarów na przesuwającym się napędzie zwrotnicowym przy różnych obciążeniach na suwaku nastawczym. Pomiarów dokonano jednocześnie za pomocą modułu pomiarowego EKD-1 oraz zintegrowanego czujnika tensometrycznego. Rejestrację przeprowadzano tylko w jednym kierunku ruchu napędu, z obciążeniem o stałej wartości realizowaną za pomocą hamulca hydraulicznego.

Pomiar modułem EKD-1

Moduł pomiarowy EKD-1 był podłączony do układu zasilania sterownika napędu zwrotnicowego. Zarejestrowane za pomocą modułu pomiarowego EKD-1 prądy i napięcia (w układzie Arona) przeliczane są w module pomiarowym na moc czynną, a następnie na podstawie modelu matematycznego silnika estymowany jest moment obciążenia i droga kątowa silnika. Droga przeliczana jest następnie na położenie suwaka nastawczego napędu wykorzystując zależności kinematyczne dla mechanizmu nastawczego. W czasie pomiarów informacją zapisywaną w formie pliku tekstowego był 9-sekundowy przebieg momentu obciążenia oraz położenia suwaka z częstotliwością próbkowania 33,3 Hz, częstotliwość ta jest wystarczająca z punktu widzenia dynamiki badanego obiektu.

Pomiar siły nastawczej czujnikiem tensometrycznym

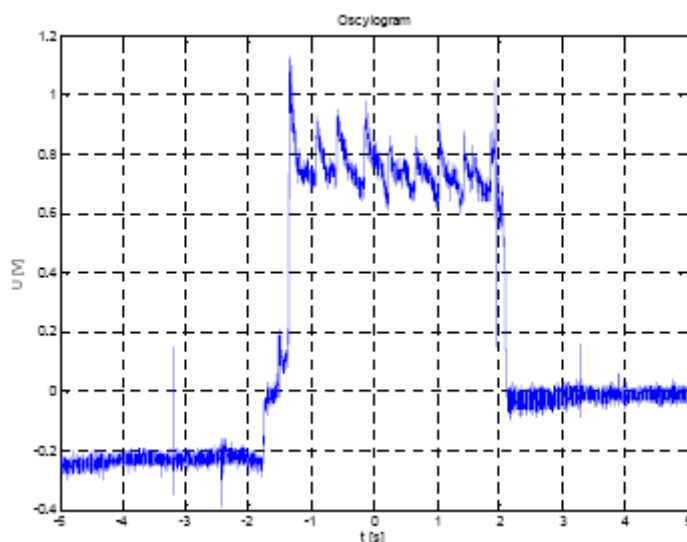
Specjalnie przygotowany do konstrukcji mechanizmu zintegrowany czujnik tensometryczny mierzył siłę działającą na suwak napędu zwrotnicowego w oczku suwaka. Do czujnika z wyjściem napięciowym podłączony był oscyloskop, który był jednocześnie rejestratorem sygnału pomiarowego. Wartości zarejestrowane z częstotliwością 1000 Hz przeskalowano zgodnie z wytycznymi firmy Movares. Czujnik tensometryczny musiał być dociskany w czasie pomiaru przez operatora, dlatego pomiary mogą być obarczone dodatkowym błędem.

Zarejestrowane przebiegi

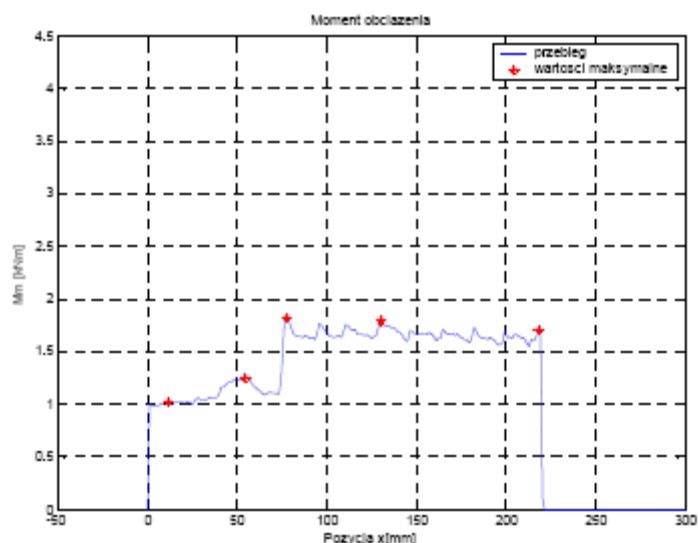
Na rysunkach 76, 77 i 78 przedstawiono wykresy dla pojedynczego procesu pomiarowego:

- przebieg napięcia z czujnika tensometrycznego – Rys.76,
- przebieg momentu obciążenia z modułu pomiarowego EKD-1 – Rys.77,
- przebieg siły obciążenia z modułu pomiarowego EKD-1 – Rys.78.

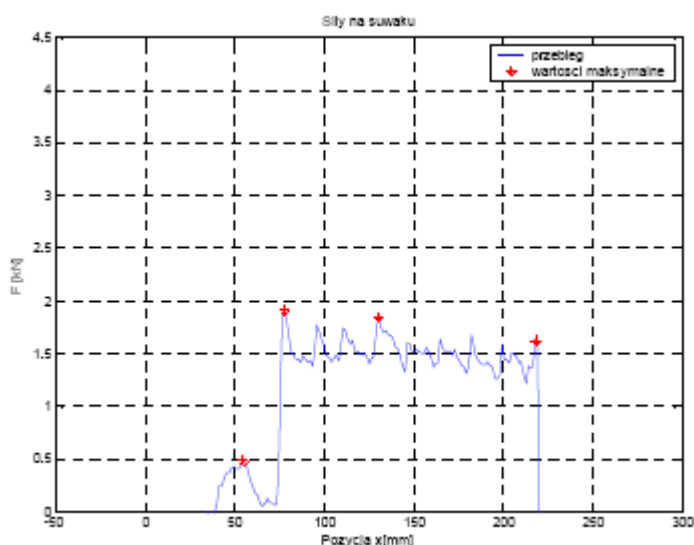
Wykres na rysunku 78 przedstawia siłę F w funkcji drogi suwaka otrzymaną przy uwzględnieniu funkcji przejścia G aproksymowaną za pomocą wielomianów oraz po skalowaniu wyników estymacji.



Rys. 76. Przebieg napięcia z czujnika tensometrycznego



Rys. 77. Przebieg momentu obciążenia z modułu pomiarowego EKD-1



Rys. 78. Przebieg siły na suwaku napędu zwrotnicowego

Przedstawiony na rysunku 78 przebieg posłużył do oceny stanu napędu.

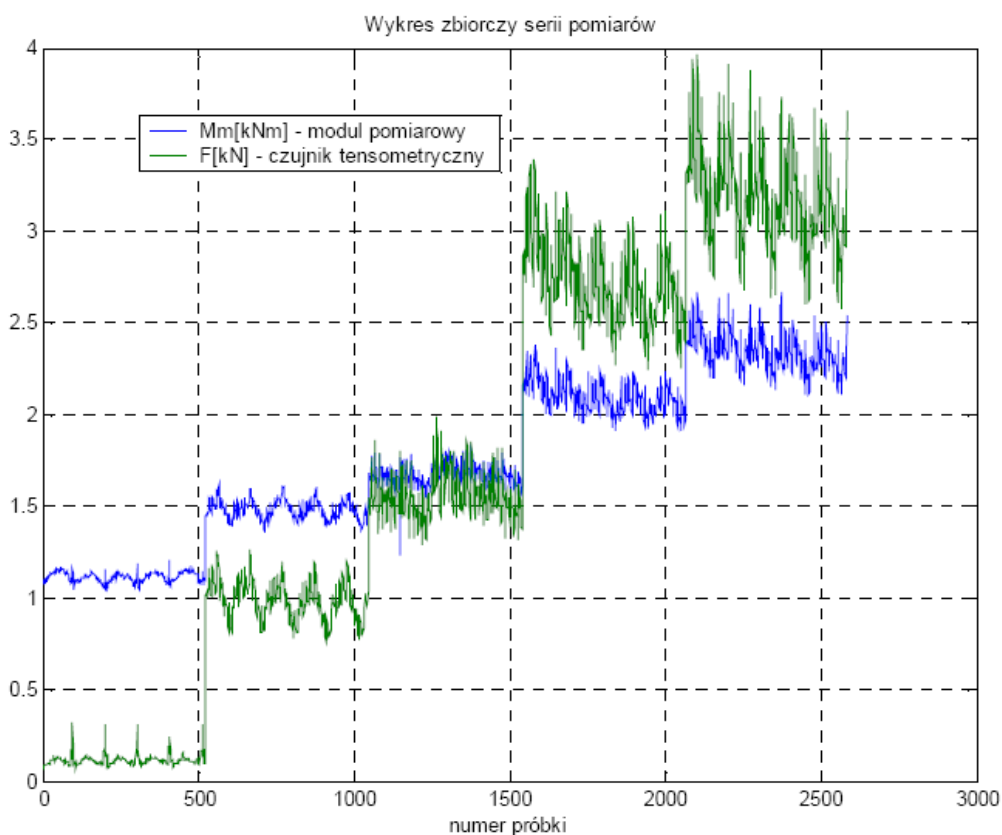
Porównanie wyników pomiarów za pomocą czujnika tensometrycznego i modułu EKD-1

W celu porównania wyników pomiarów przefiltrowano uzyskane sygnały z czujnika tensometrycznego oraz przeprowadzono ich decymację tak, aby częstotliwość próbkowania obu porównywanych sygnałów była jednakowa. Ponieważ

badane przebiegi nie były synchronizowane, dla każdego procesu pomiarowego przesunięto sygnały względem siebie o odpowiednią liczbę próbek tak, aby oba rozpoczynały się w tym samym momencie (graficzne dopasowanie wykresów). Następnie wyskalowano przebieg z czujnika tensometrycznego realizując następujące czynności:

- usunięcie offsetu na podstawie analizy serii pomiarów;
- wymnożenie $U[V] \cdot 2 = F[kN]$ (współczynnik kalibracji);
- pomniejszono wynik o 4,762% (wyskalowany czujnik tensometryczny wskazuje o 5% za dużo; systematyczny błąd czujnika)

Tak przetworzone przebiegi dla kilku wartości siły hamującej przedstawiono rysunku 79.



Rys. 79. Wykres zbiorczy serii pomiarów

Uzyskane wyniki posłużyły do wyznaczenia funkcji przejścia G.

Wyznaczenie funkcji przejścia

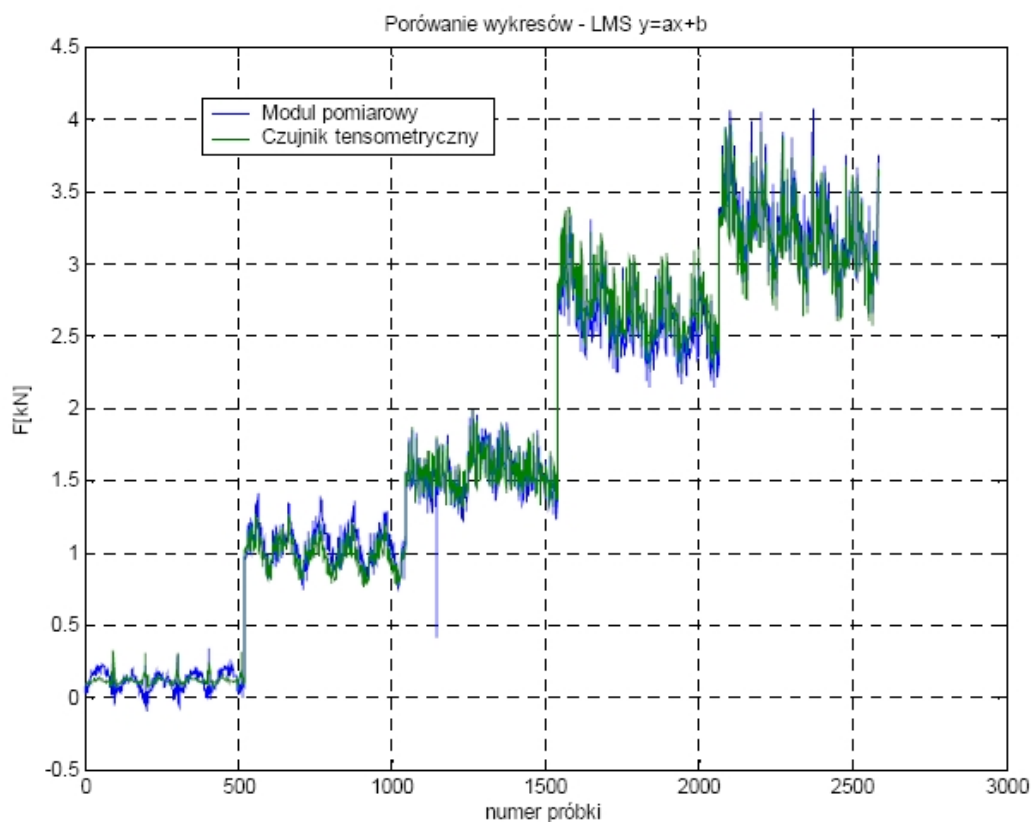
Na podstawie przebiegów serii pomiarów, przedstawionych na rys. 79 oraz informacji uzyskanych na podstawie modelu napędu zwrotnicowego stwierdzono, że nie ma stałego współczynnika pozwalającego na wyznaczenie siły nastawczej na podstawie wyestymowanego momentu M_n . Dla estymacji siły nastawczej należy wyznaczyć przebieg funkcji przejścia. Zaproponowano aproksymację tych funkcji za pomocą wielomianów:

- $y = ax + b$
- $y = ax^2 + bx + c$
- $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$
- $y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$ [1]

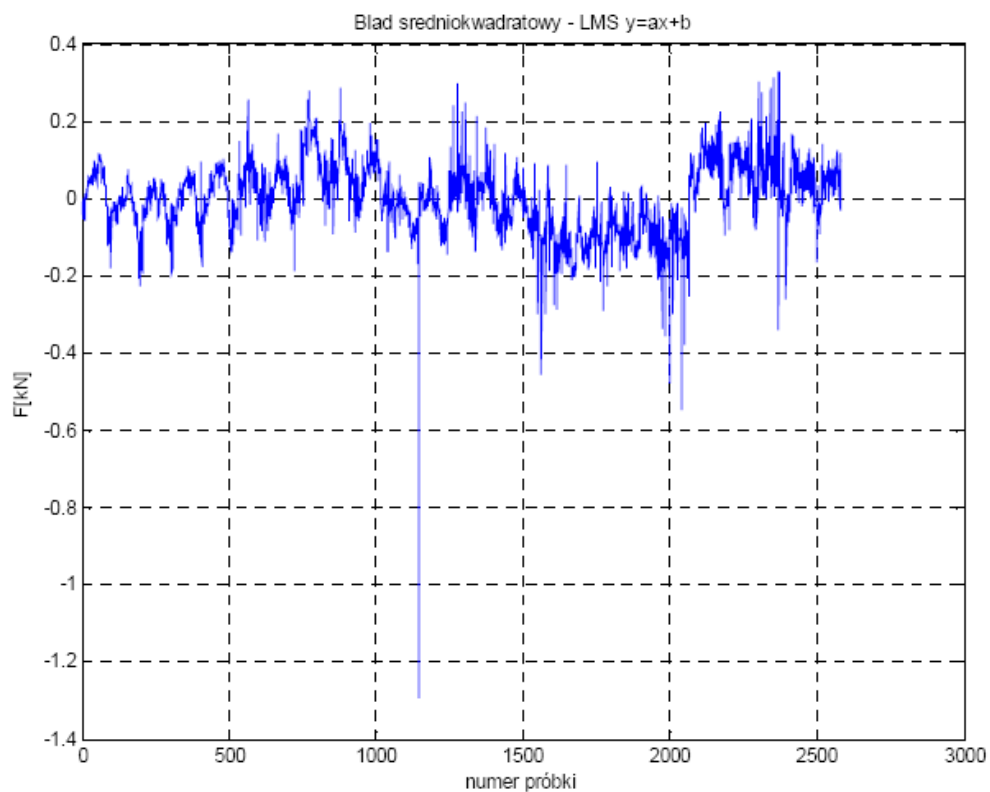
gdzie: y – wartość wyznaczonej siły nastawczej

x - wartości otrzymane z modułu pomiarowego

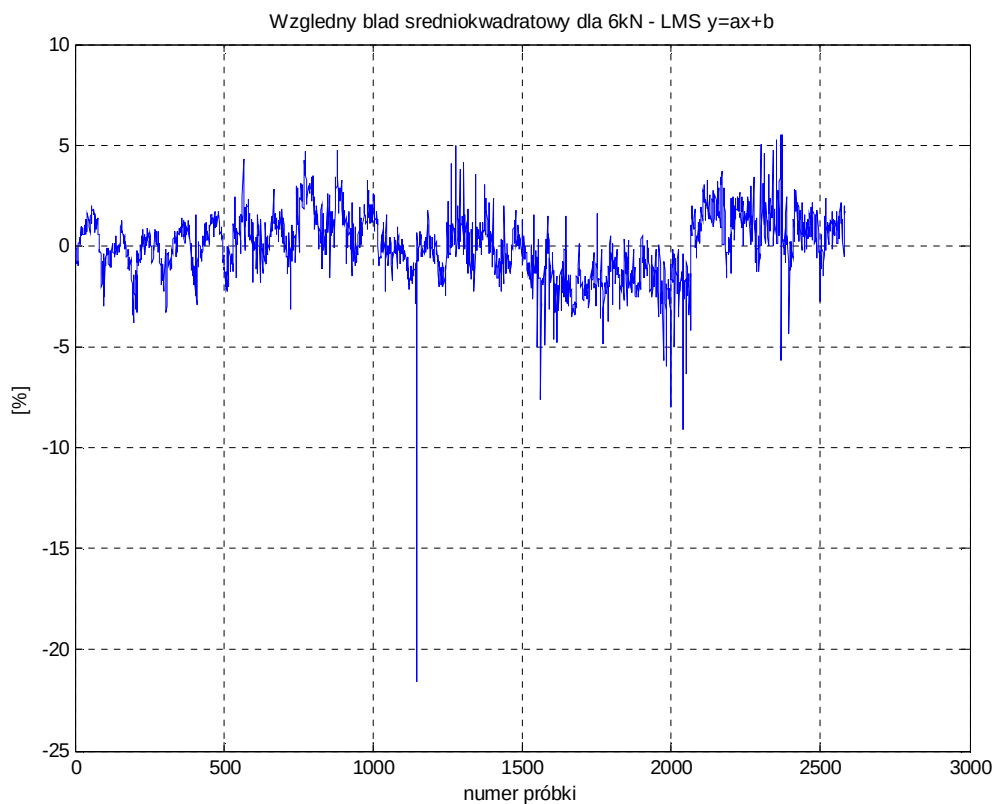
Współczynniki poszczególnych wielomianów aproksymujących funkcje przejścia G wyznaczono na podstawie minimalizacji błędu średniokwadratowego. W wyniku otrzymano dopasowanie dla funkcji przejścia liniowej widoczne na rysunku 80, charakteryzujące się błędami średniokwadratowymi przedstawionymi na rysunku 81. Na rysunkach 82 i 83 pokazano względne błędy średniokwadratowe otrzymane odpowiednio dla funkcji przejścia liniowej i czwartego stopnia przy obciążeniu suwaka napędu siłą 6kN.



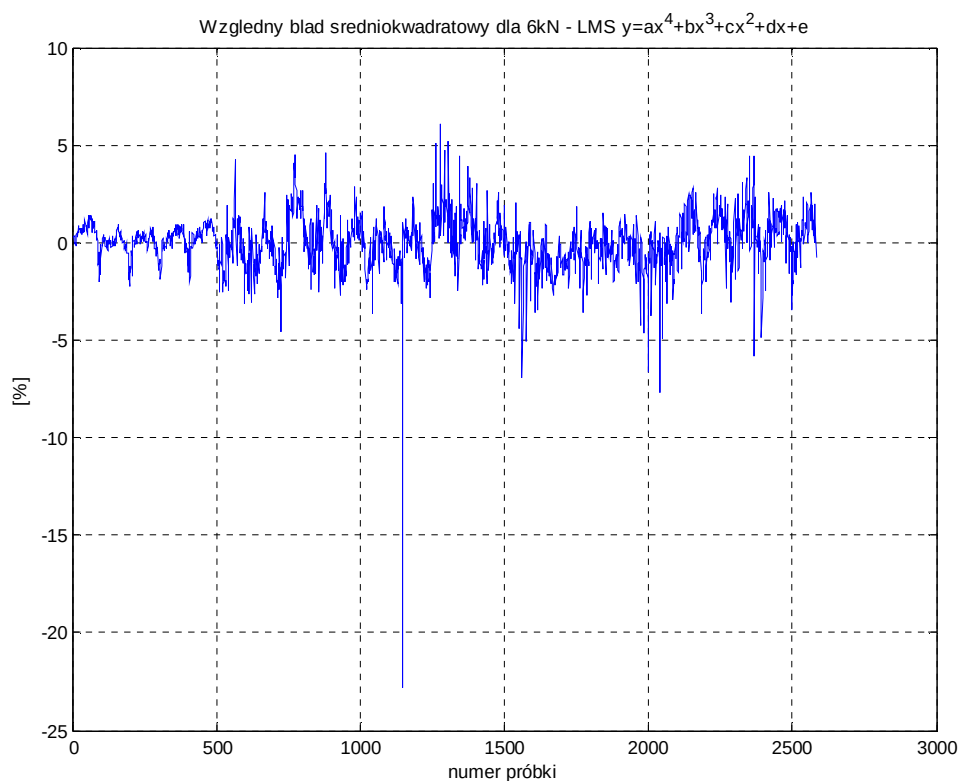
Rys. 80. Porównanie wykresów – LMS $y=ax+b$



Rys. 81. Błąd średniokwadratowy – LMS $y=ax+b$

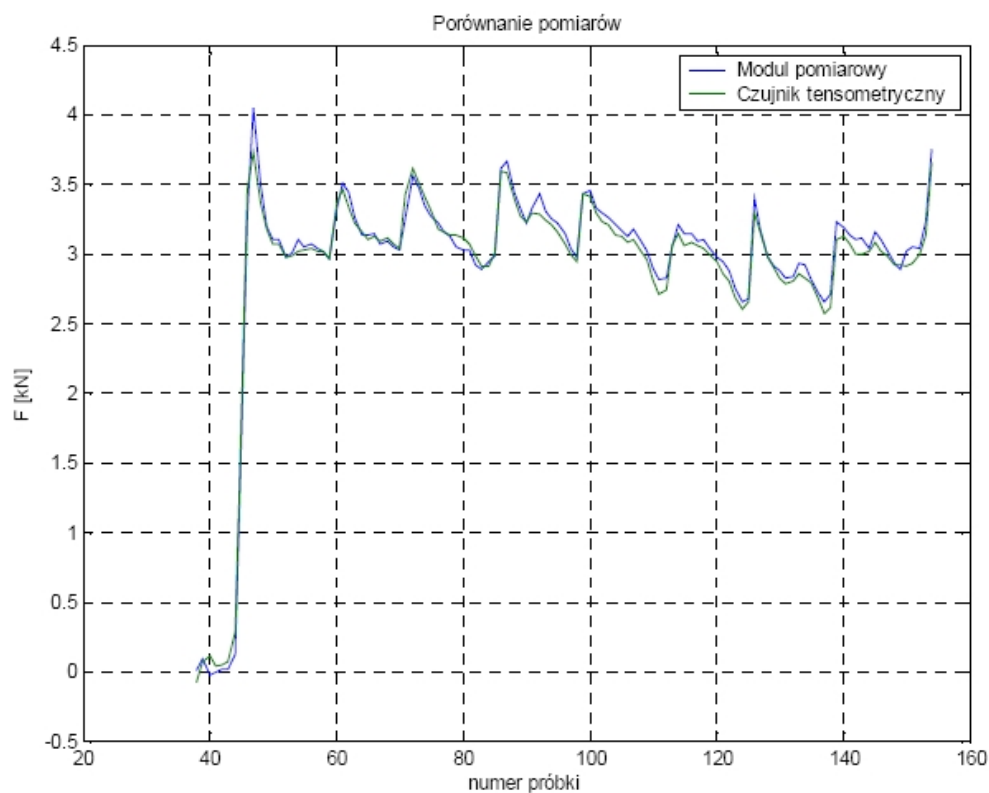


Rys. 82. Względny błąd średniokwadratowy – LMS $y=ax+b$



Rys. 83. Względny błąd średniokwadratowy – LMS $y=ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$

Jak widać z uzyskanych wyników oceny jakości aproksymacji dla prawidłowego (z błędem mniejszym jak 5%) wyznaczenia siły nastawczej poprzez pomiar wielkości w układzie elektrycznym napędu, wystarczy zastosować funkcje przejścia $G(x)$ aproksymowaną za pomocą funkcji liniowej. Przy wyborze sugerowano się minimalizacją ilości niezbędnych obliczeń oraz niewielką różnicą w dokładności dla bardziej złożonych funkcji przejścia. Dla wszystkich analizowanych funkcji przejścia względny błąd średniokwadratowy wynosi $\pm 5\%$, co widać na rysunkach 82 i 83. Ostateczne porównanie obu metod (EKD-1 i tensometr) dla wybranego pojedynczego pomiaru przedstawia rysunek 84.



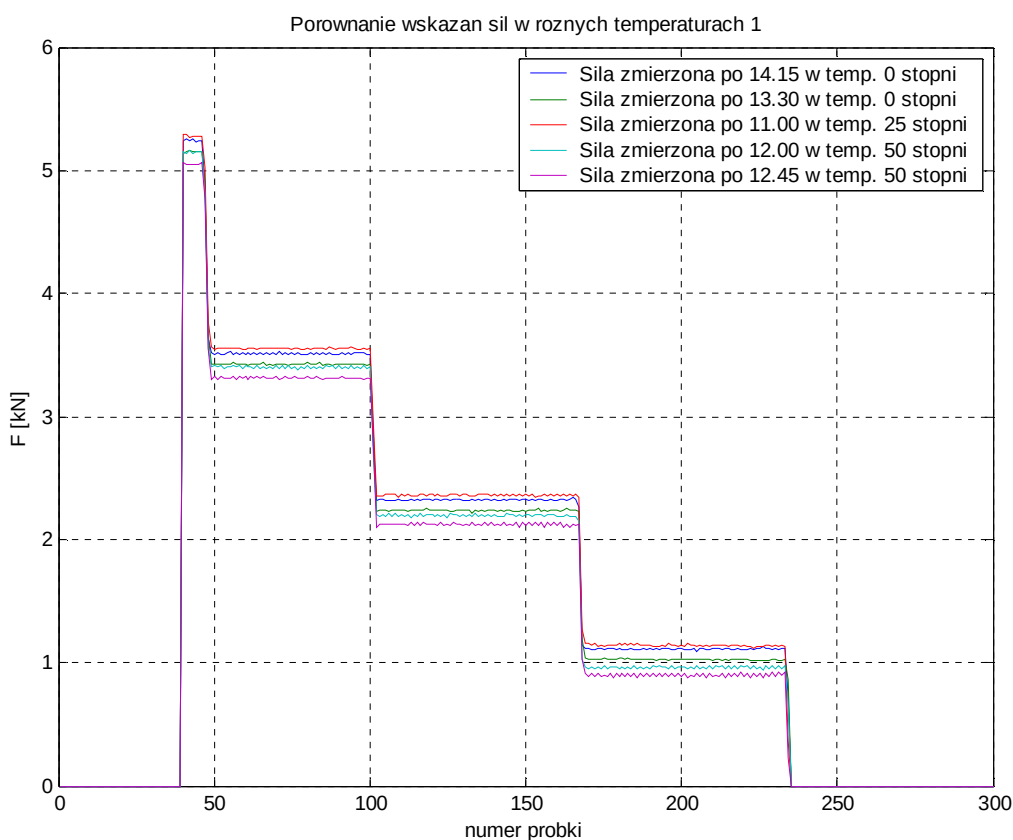
Rys. 84. Porównanie obu metod pomiarowych po przeskalowaniu funkcją liniową

Przeskalowany przebieg zmierzony za pomocą modułu pomiarowego EKD-1 niewiele odbiega od przebiegu sił zmierzonych czujnikiem tensometrycznym a dokładność pomiaru jest wystarczająca na potrzeby systemu diagnostyki.

Błąd pomiarowy może wynikać z niedokładności wyznaczenia współczynników funkcji przejścia, a to z kolei spowodowane jest stosunkowo niewielką liczbą przebiegów na podstawie, których dokonano oszacowania funkcji przejścia. Kolejnym powodem błędów mogą być przybliżone (wyznaczone na podstawie dokumentacji silnika), a nie rzeczywiste (wyznaczone przy pomocy hamulca) parametry modelu samego silnika.

Badania temperaturowe modułu EKD-1

Dodatkowo dla określenia wpływu temperatury otoczenia na pomiary modułem EKD-1 przeprowadzono testy modułu w komorze klimatycznej. Przeprowadzono 5 serii pomiarów modułem w następujących temperaturach 0°C, 25°C i 50°C. Pomiary wykonano na silniku obciążonym hamulcem elektrycznym o stałym momencie oporu. W każdej temperaturze wykonano pomiary przy 3 różnych wartościach obciążenia. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 85.



Rys. 85. Porównanie pomiarów przy różnych temperaturach otoczenia.

Z wyników przeprowadzonych testów wynika, że maksymalna różnica w pomiarach w stosunku do temperatury odniesienia 25°C wynosi 200N i dotyczy pomiarów w temperaturze 50°C. Można też zaobserwować, iż różnica w pomiarach jest stała i nie zależy od wartości momentu obciążenia silnika. Pozwala to w prosty sposób korygować wyniki estymacji siły przy zmianach temperatury otoczenia.

Opracowaną metodę oceny siły nastawczej zaimplementowano w module diagnostycznym EKD-1. Dla celów implementacji wykonano oprogramowanie, które uruchomiono na procesorze w module diagnostycznym. Walidację działania modułu przeprowadzono poprzez badania terenowe.

6. Badania terenowe prototypu modułu monitorowania

6.1. Badania na stacji kolejowej Kobiór

Na stacji kolejowej Kobiór w październiku 2008 roku przeprowadzono badania terenowe modułu EKD-1. Moduł włączono w nastawni w obwody zasilania napędów zwrotnicowych typu EEA-5 (rysunek 86). Badane napędy zainstalowane były w torach głównych, w rozjazdach zwyczajnych o promieniu R300. Rozjazdy te były wyposażone w dodatkowe sprężynowe urządzenia dociskające iglicę.



Rys. 86. Podłączenie modułu pomiarowego w nastawni stacji Kobiór

Pomiarów dokonano jednocześnie za pomocą modułu pomiarowego EKD-1 oraz zintegrowanego czujnika tensometrycznego (rys. 87). Zintegrowany czujnik tensometryczny był zainstalowany w oczku suwaka napędu zwrotnicowego. Do czujnika z wyjściem napięciowym podłączony był oscyloskop, który był jednocześnie rejestratorem sygnału pomiarowego z czujnika. Rejestrację przeprowadzano dla dwóch napędów przestawianych w obu kierunkach podłączonych do dwóch różnych obwodów nastawczych. Każdy badany napęd był sprzężony elektrycznie z drugim napędem w innej zwrotnicy w tzw. układzie sprzężonym. Oba badane napędy pracowały jako pierwsze w układzie sprzężonym. Oznacza to, że po zakończeniu przestawiania badanego napędu, rozpoczynał pracę automatycznie sprzężony elektrycznie napęd w drugiej zwrotnicy zasilany z tego samego obwodu

nastawczego. Przeprowadzenie pomiarów było dodatkowo utrudnione przez prowadzony na badanych rozjazdach normalny ruch pociągów.



Rys. 87. Badany napęd nr 1 na stacji Kobiór.

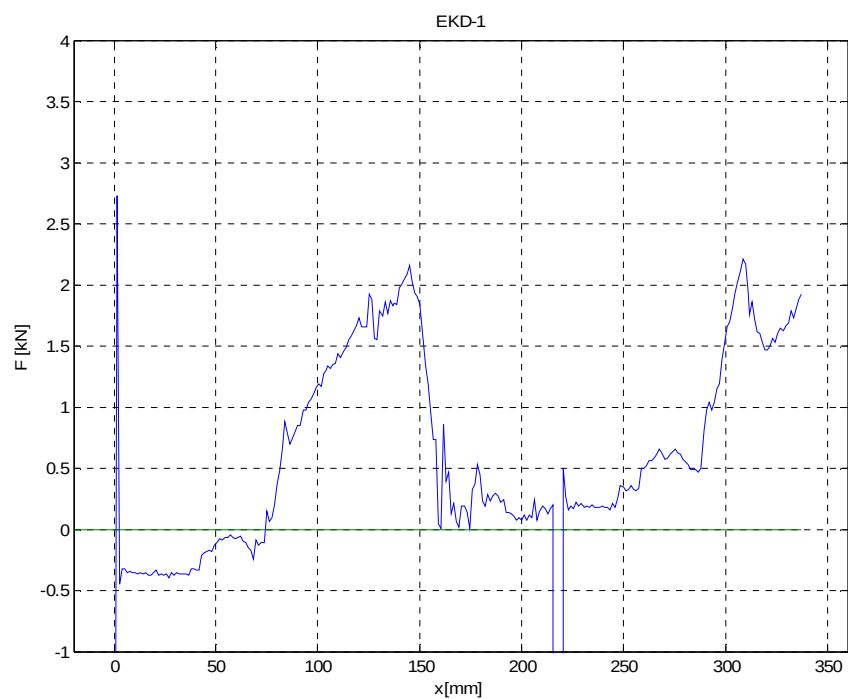
6.2. Zarejestrowane przebiegi

W sumie zarejestrowano 16 przebiegów, 10 dla napędu nr 1 i 6 dla napędu nr 2. Mała liczba zarejestrowanych przebiegów wynika z faktu prowadzenia na badanych rozjazdach w czasie normalnego ruchu pociągów.

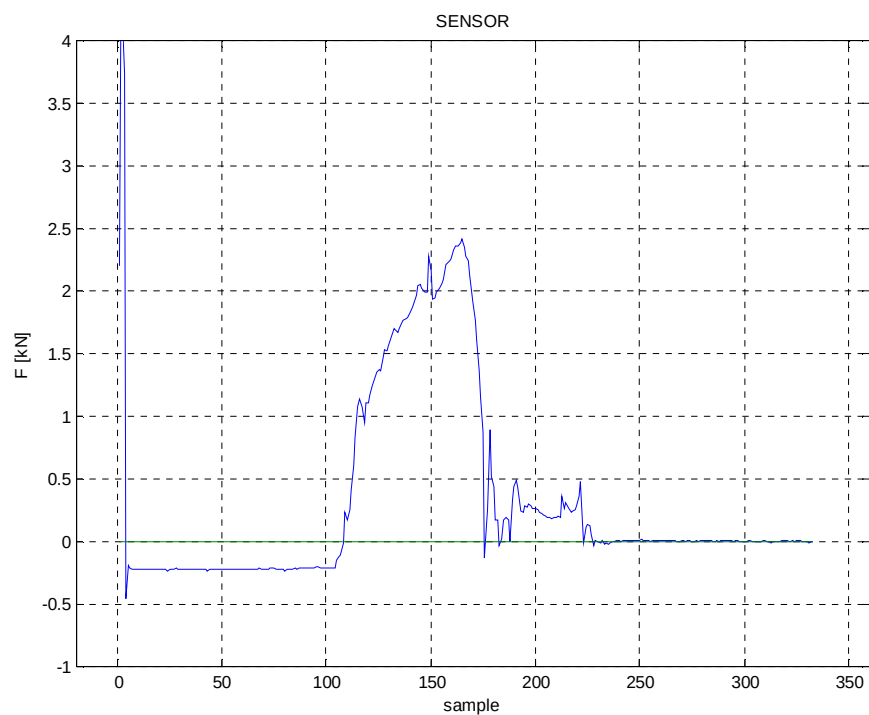
Poniżej zamieszczono wykresy dla pojedynczego procesu pomiarowego:

- przebieg siły oporów przestawiania dla napędu w funkcji drogi suwaka nastawczego zarejestrowany poprzez moduł pomiarowy EKD-1.
- przebieg siły oporów przestawiania dla napędu w funkcji drogi suwaka nastawczego zarejestrowany czujnikiem tensometrycznym.

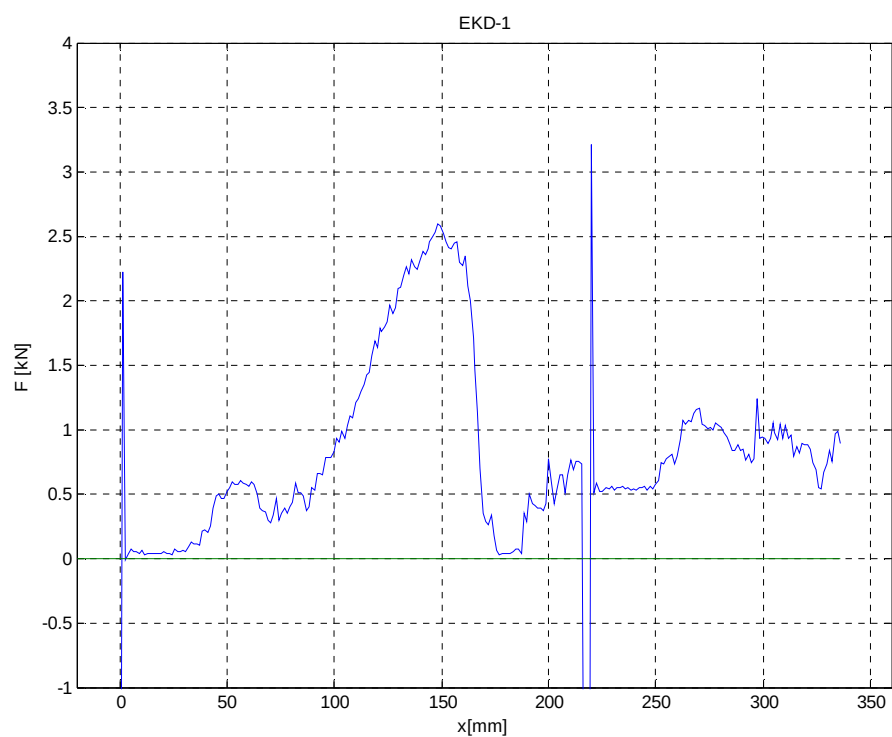
Na rysunkach 88 i 90 przedstawiono przebiegi siły oporów przestawiania dla napędu w funkcji drogi suwaka nastawczego zarejestrowane modułem pomiarowym EKD-1 na napędzie odpowiednio nr 1 i nr 2. Na rysunkach 89 i 91 przedstawiono przebiegi siły oporów przestawiania dla napędu w funkcji drogi suwaka nastawczego zarejestrowane czujnikiem tensometrycznym na napędzie odpowiednio nr 1 i nr 2.



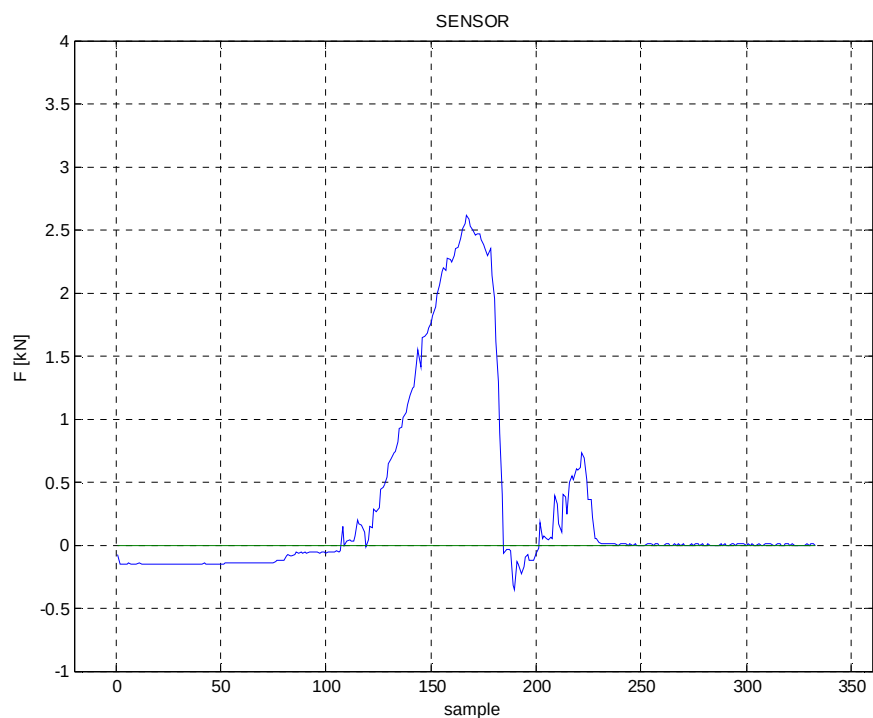
Rys. 88. Przebieg siły oporów przestawiania dla napędu nr 1 zarejestrowany modułem EKD-1



Rys. 89 Przebieg siły oporów napędu nr 1 zarejestrowany czujnikiem tensometrycznym



Rys. 90. Przebieg siły oporów przestawiania dla napędu nr 2 zarejestrowany modułem EKD-1



Rys. 91 Przebieg siły oporów napędu nr 2 zarejestrowany czujnikiem tensometrycznym

Na rysunkach 88 i 90 zarejestrowanych modułem EKD-1, dla skoku powyżej 220mm zostały zarejestrowane opory dla drugiego napędu sprzężonego, który po zakończeniu przestawiania badanego napędu, rozpoczynał automatycznie pracę w drugiej zwrotnicy. Rejestracja ta wynika ze stałego czasu rejestracji modułu EKD-1 wynoszącego 9 sekund oraz wspólnego zasilania napędów sprzężonych. Dla celów porównawczych tę część przebiegów usunięto.

6.3. Porównanie wyników pomiarów

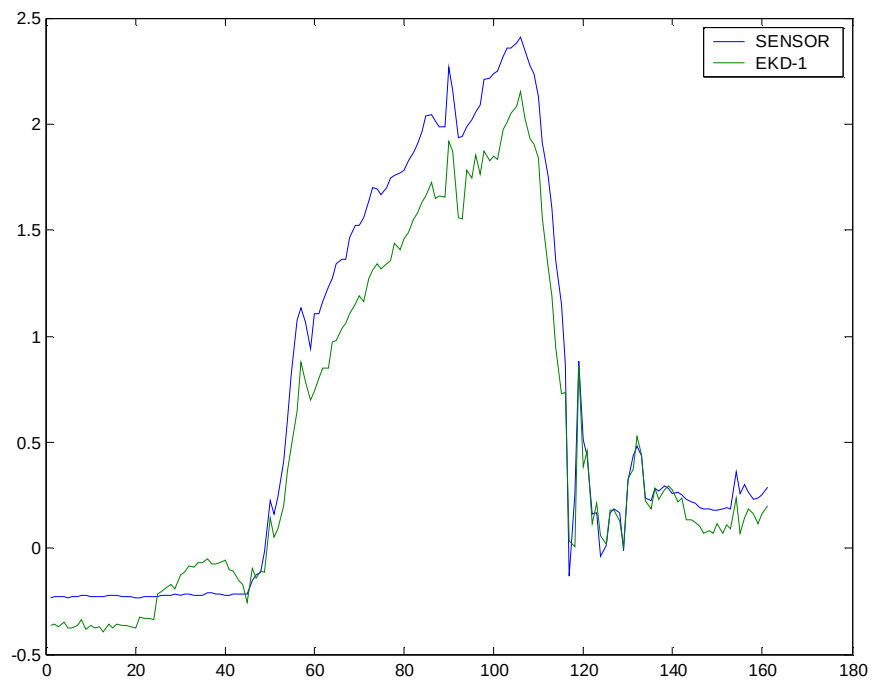
W celu zestawienia wyników przefiltrowano uzyskane dane z czujnika tensometrycznego zarejestrowane za pomocą oscyloskopu oraz przeprowadzono ich, decymację tak, aby częstotliwość próbkowania obu porównywanych sygnałów była jednakowa. Następnie wyskalowano przebieg z czujnika tensometrycznego według następującej procedury:

- a) usunięcie offsetu na podstawie serii pomiarów;
- b) wyznaczenie wartości bezwzględnej siły,
- c) przeskalowanie do wartości siły według wzorca firmy Movares: $k=1.388$
tzn. $\text{wymnożenie } U[V] * k = F[kN]$;

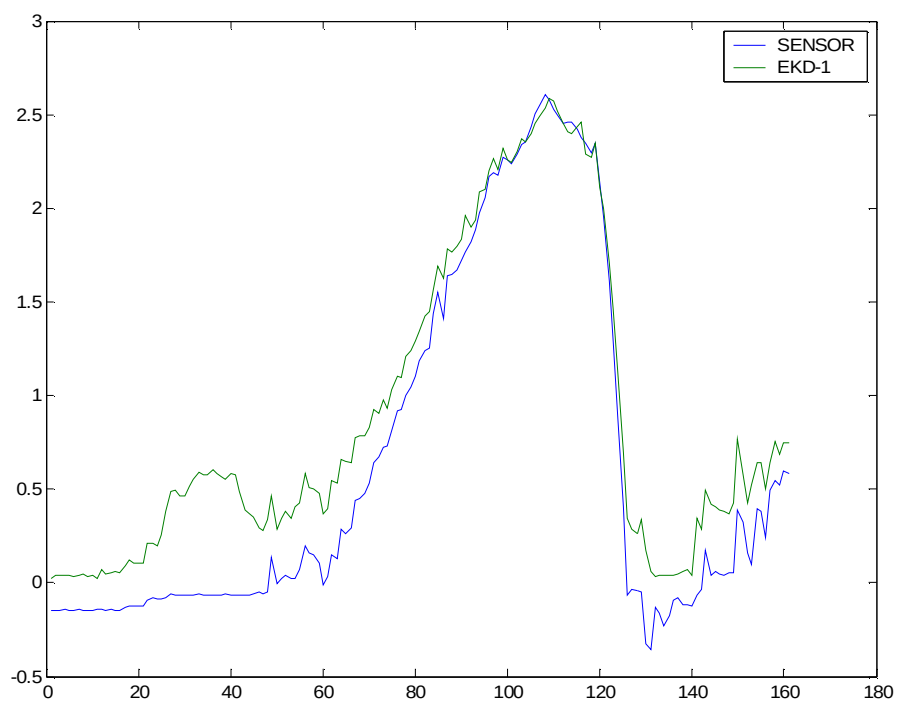
Ponieważ badane przebiegi nie były synchronizowane, dla każdego procesu pomiarowego z modułu EKD-1 przesunięto sygnały względem siebie o odpowiednią liczbę próbek.

Przebiegi porównane są wyskalowane w próbkach (tzn. w czasie), a nie w funkcji przesunięciu suwaka. Jedynie moduł EKD-1 estymuje położenie, stąd wyniki z modułu EKD-1 wyskalowane są w funkcji drogi suwaka nastawczego napędu, co wnosi dodatkową informację diagnostyczną.

Tak przeskalowane pary przebiegów połączono ze sobą na wspólny przebieg, którego przykład dla napędu nr 1 przedstawiony jest na rysunku 92 a dla napędu nr 2 na rysunku 93.



Rys. 92. Porównanie przebiegów siły oporów dla napędu nr 1.



Rys. 93. Porównanie przebiegów siły oporów dla napędu nr 2.

6.4. Podsumowanie badań terenowych

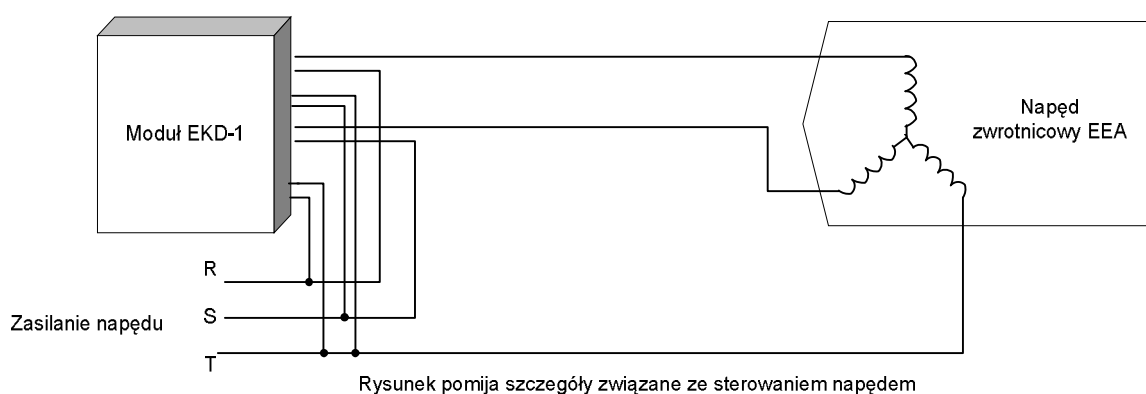
Przeprowadzone badania terenowe potwierdzają możliwość zarejestrowania przebiegów sił modułem EKD-1 w warunkach terenowych w nastawni stacyjnej. Zarejestrowane przebiegi sił oporów modułem EKD-1 są zbieżne z rejestracją czujnikiem tensometrycznym i oscyloskopem w granicach wcześniej wyznaczonego błędu. Na rysunkach 92 i 93 wyraźnie widać, że modułem pomiarowym EKD-1 możemy zarejestrować obciążenie napędu jeszcze przed rozpoczęciem przestawiania suwaka nastawczego i zwrotnicy, co może stanowić informację o stanie napędu np. o występowaniu dodatkowych oporów wewnętrznych.

7. Koncepcja systemu diagnozowania

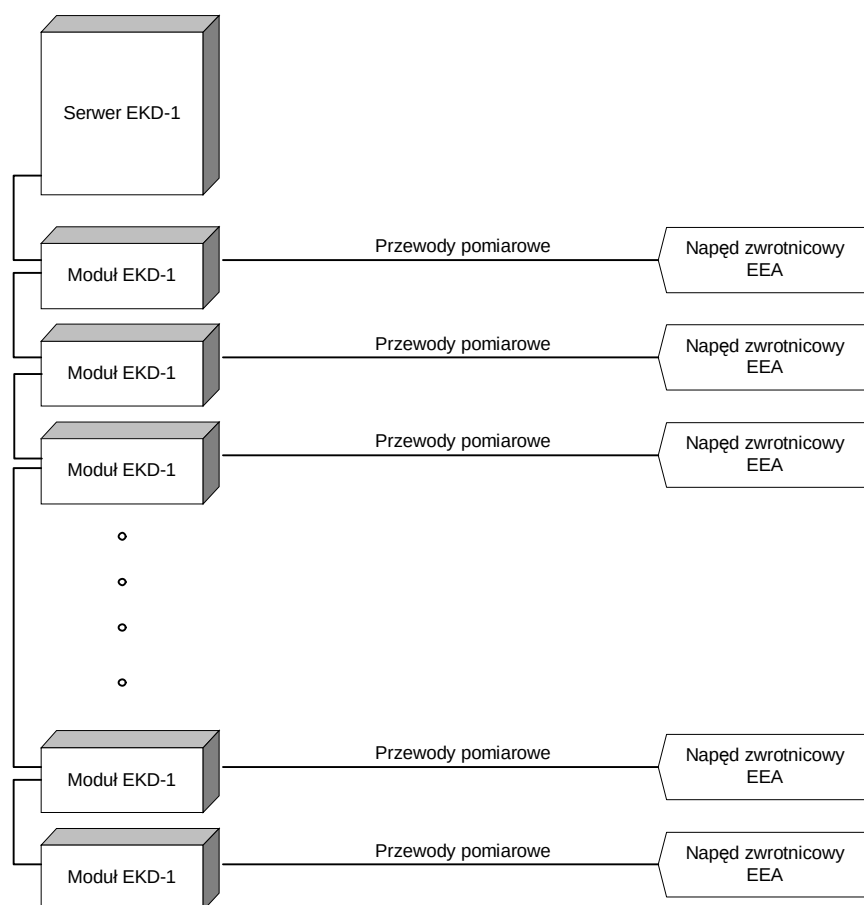
Ze względu na to, że włączony w obwody elektryczne nastawni system monitorowania działa w sposób ciągły, napędy zwrotnicowe są nadzorowane podczas każdego przestawiania rozjazdu. Podłączenie modułu do napędu pokazano na rysunku 94. Każdy z modułów przeznaczony jest do pomiaru jednego napędu zwrotnicowego. Moduły są podłączone do serwera modułów (rysunek 95), który za pomocą sieci ethernet przesyła sygnały odpowiadające wyznaczonej sile oporów do lokalnego serwera systemu diagnostycznego SDK. Następnie sygnały te mogą być przetworzone i sprawdzone przez algorytm detekcji uszkodzeń w lokalnym serwerze systemu diagnozowania. Idee gromadzenia danych diagnostycznych pokazano na rysunku 96 [76].

Każdy lokalny serwer jest połączony z centralnym serwerem SDK, który stanowi centralną bazę danych diagnostycznych. Informacje na temat każdego rozjazdu na danej sieci kolejowej mogą być przedstawione służbom serwisu lub eksploatacji.

W centralnej bazie danych oprócz wyników analiz, mogą znajdować się informacje o typie rozjazdu, liczbie zadziałań każdego z napędów zwrotnicowych, informacje o przeprowadzonych pracach serwisowych czy wyniki pomiarów sprzed i po dokonaniu modyfikacji. Tak zaproponowana architektura systemu monitorowania zapewnia dostosowanie go do rozproszonego charakteru infrastruktury kolejowej.

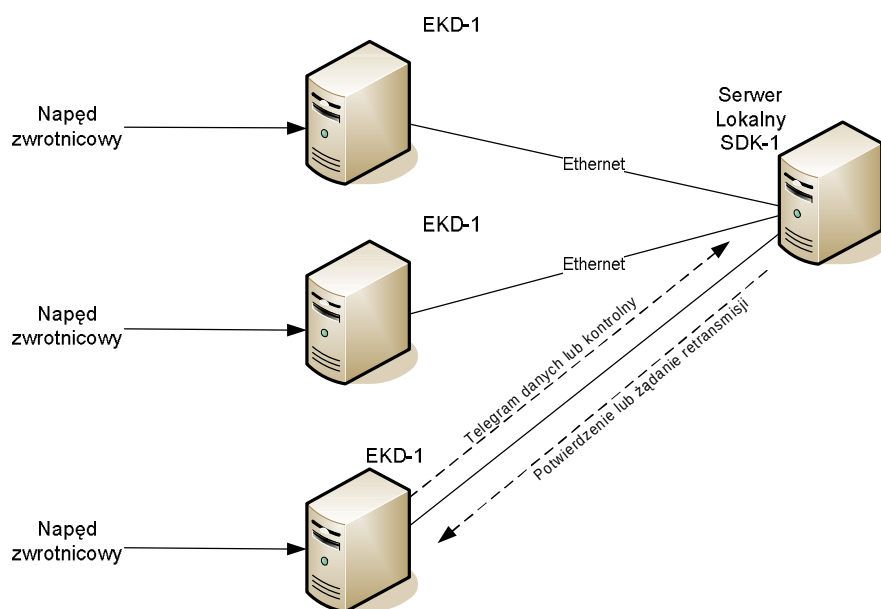


Rys. 94. Podłączenie modułu EKD-1 do napędu zwrotnicowego



Rys. 95. Idea układu pomiarowego napędów zwrotnicowych.

Poszczególne moduły są podłączone do przewodów zasilających napędy na nastawni, ułatwia to instalację systemu gdyż nie wymaga ingerencji w urządzenia przytorowe.



Rys. 96. Idea gromadzenia danych diagnostycznych z napędów zwrotnicowych

Przedstawiony na rysunku 96 system umożliwia zbieranie danych dotyczących wybranego obszaru sieci lub całej sieci na jednym serwerze danych. Następnie zebrane sygnały mogą być przetworzone i sprawdzone przez algorytm detekcji uszkodzeń w lokalnym serwerze systemu diagnozowania a jakość tego algorytmu ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania całego systemu diagnostycznego. W kolejnym punkcie pracy przedstawiono koncepcję algorytmu detekcji uszkodzeń z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji.

7.1. Diagnostyka napędu metodami AI

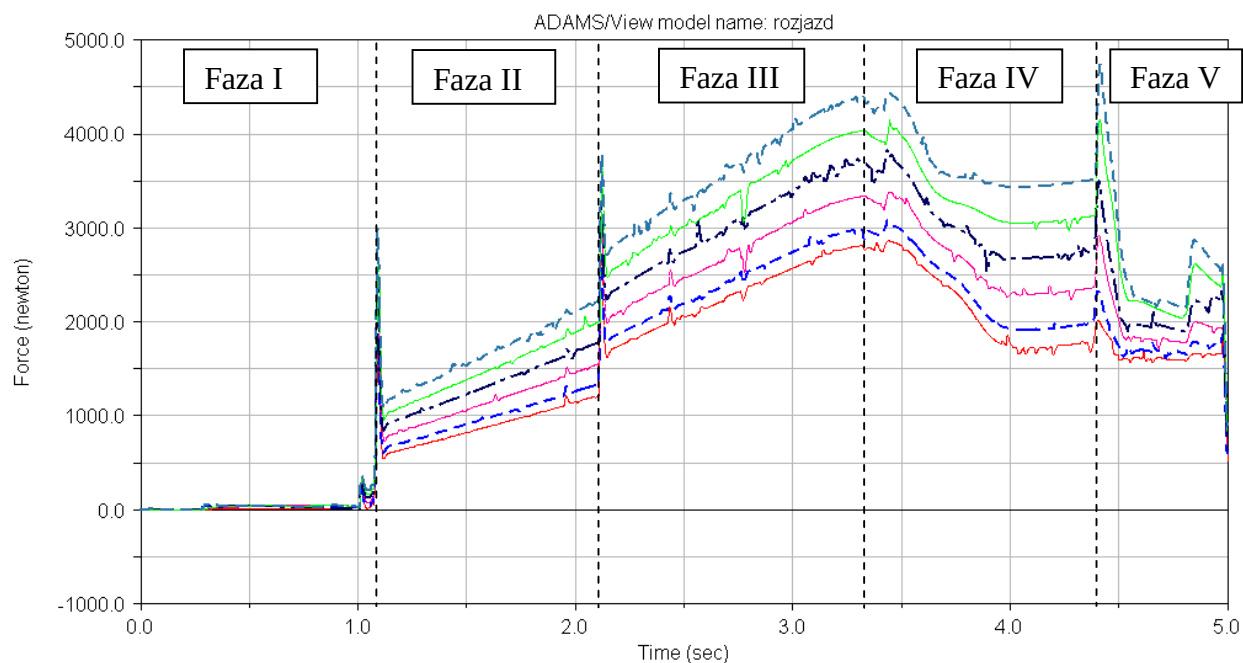
Celem algorytmu detekcji uszkodzeń będzie automatyczne wykrywanie uszkodzeń w oparciu o pomiary siły nastawczej napędu zarejestrowane za pomocą modułu EKD-1. W pracy podjęto próbę opracowania takiego algorytmu z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Dla osiągnięcia automatycznej procedury wnioskowania i sprawdzenia możliwości zrealizowania takiego systemu dla napędu zwrotnicowego zastosowano trzy metody, dwie metody klasyfikacji: metodę Warda [25] i k-średnich [46] oraz samoorganizującą sieć neuronową typu Kohonena [40].

Ponieważ na obecnym etapie pracy nie są dostępne zmierzone rzeczywiste przebiegi dla możliwych awarii napędu do analizy wykorzystano dane pochodzące z symulacji modelu wielobryłowego układu napęd - zwrotnica opisanej w rozdziale 4. Na podstawie konsultacji z ekspertami producenta analizowanego napędu do analizy przyjęto wyniki symulacji dla siedmiu przykładowych wariantów: II, III, IV, V, VIII, IX, XII oraz że analizie zostaną poddane przebiegi zmiany siły w połączeniu drążka z napędem. Każdy z wariantów był reprezentowany przez przypadek najlepszy (najmniejsza zastosowana w symulacji wartość parametru opisującego daną niesprawność) i przypadek najgorszy (największa zastosowana w symulacji wartość parametru opisującego daną niesprawność). Otrzymano w ten sposób 14 przypadków, które przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Warianty symulacji usterek przyjęte do analizy

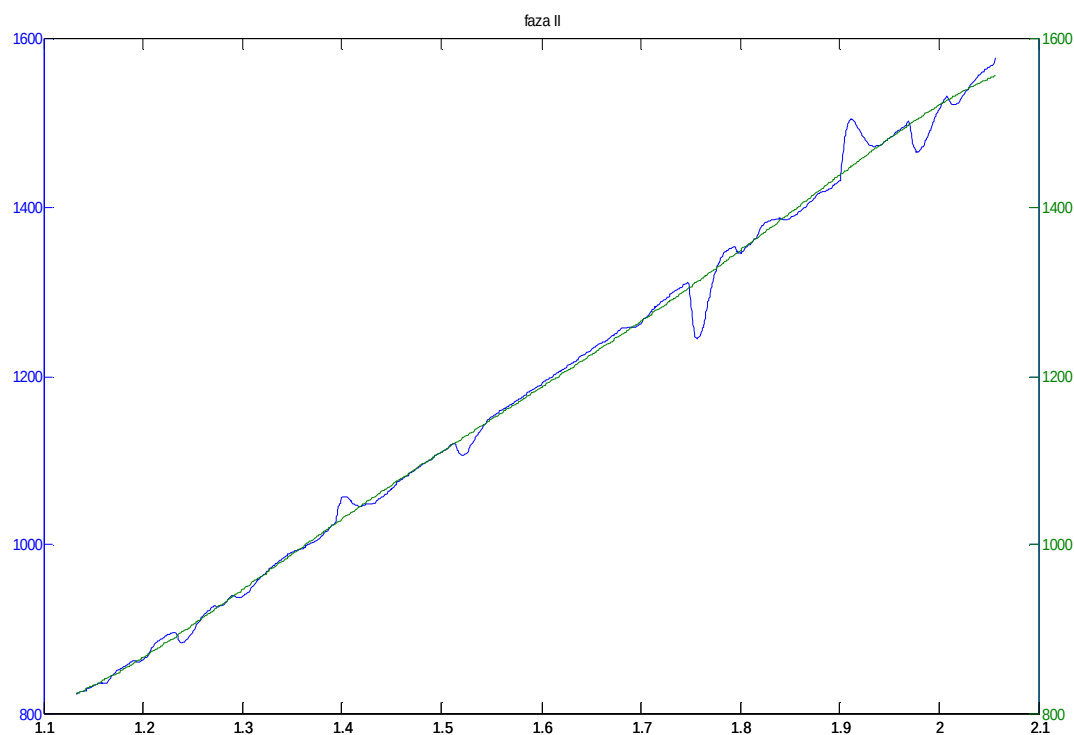
Wariant symulowany	Przypadek najlepszy	Przypadek najgorszy
Zmiana współczynnika tarcia w łożyskach suwaka nastawczego napędu – II	C1	C2
Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu liniału w napędzie – III	C3	C4
Zmiana współczynnika tarcia w prowadzeniu drążka suwakowego zamknięcia – IV	C5	C6
Zmiana współczynnika tarcia kłamry zamknięcia iglicy drugiej – V	C7	C8
Zmiana współczynnika tarcia prowadzenia iglic – VIII	C9	C10
Zmiana współczynnika tarcia kłamry zamknięcia iglicy pierwszej – IX	C11	C12
Zmiana geometrii w układzie drążek – kłamra – XII	C13	C14

Ponieważ otrzymane z symulacji przebiegi sił mają duży rozmiar, każdy z przebiegów zawiera 10000 próbek, ich grupowanie jest bardzo trudne. Podjęto próbę wykorzystania do analizy, współczynniki wielomianów aproksymujących te przebiegi. Pozwala to na redukcję rozmiaru analizowanych wektorów reprezentujących przebiegi sił nastawczych. Zaproponowany podział przebiegu na charakterystyczne fazy przedstawiono na rysunku 97. Współczynniki wielomianów aproksymujących przebiegi wyznaczono dla każdej fazy. Przyjęto rząd wielomianów 5, co daje dla czterech faz rozmiar wektora współczynników 24. Fazę pierwszą pominięto w analizach, ponieważ przebieg siły w tej fazie ma wartość stałą i wynosi zero.



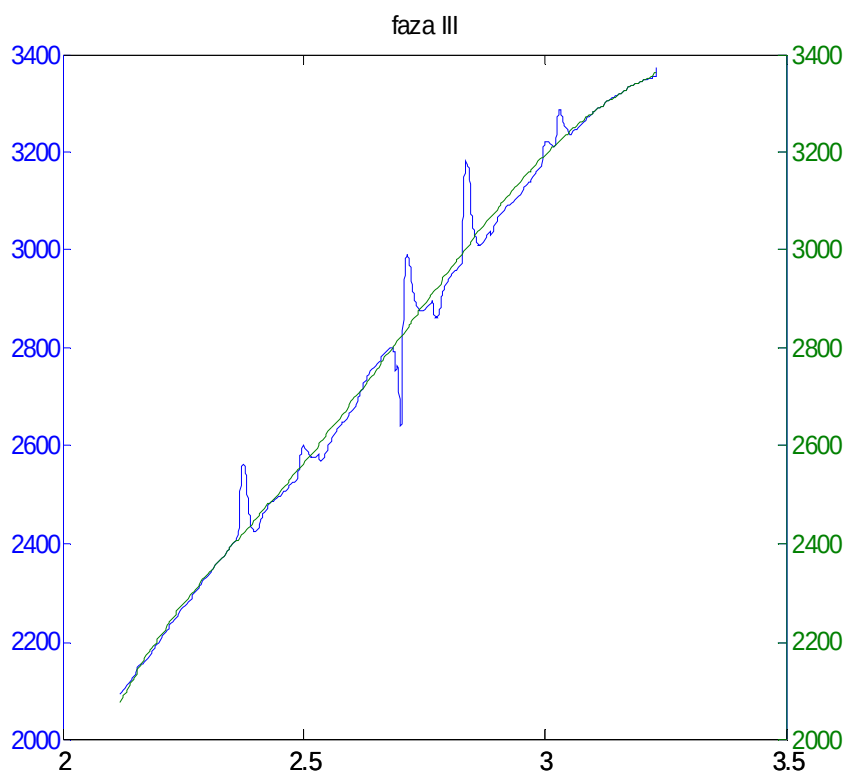
Rys. 97. Wykres siły nastawczej wyznaczony za pomocą symulacji z podziałem na fazy

Przykładową aproksymację wielomianową dla II fazy przedstawiono na rysunku 98.



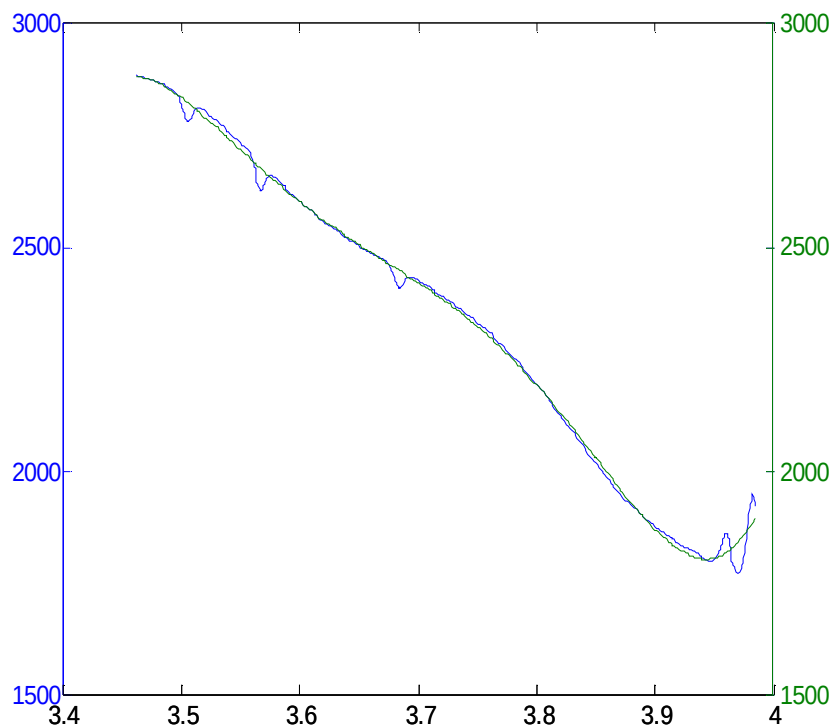
Rys. 98. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie II.

Przykładową uzyskaną aproksymację wielomianową dla III fazy przedstawiono na rysunku 99.



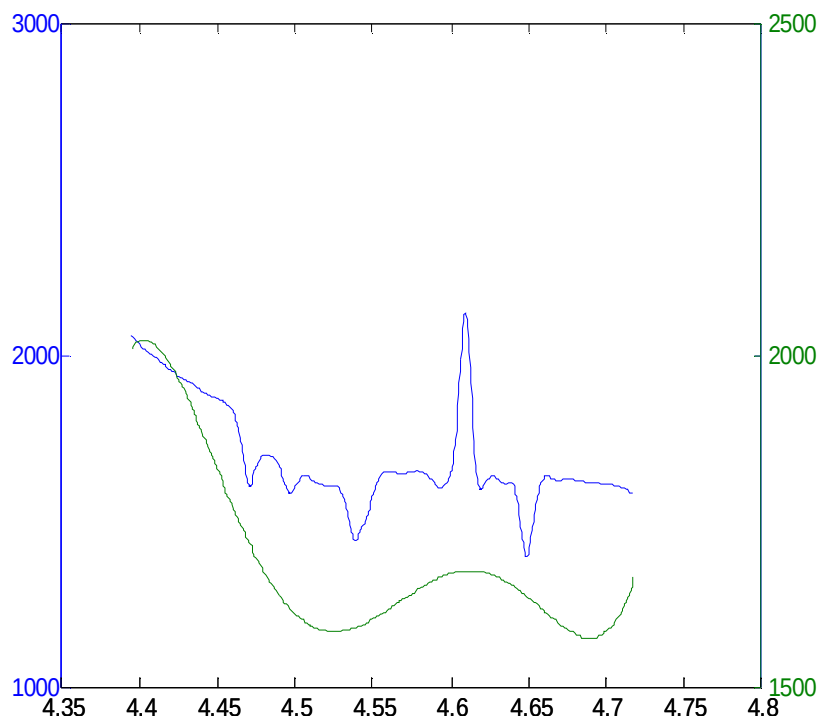
Rys. 99. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie III.

Przykładową uzyskaną aproksymację wielomianową dla IV fazy przedstawiono na rysunku 100.



Rys. 100. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie IV.

Przykładową uzyskaną aproksymację wielomianową dla V fazy przedstawiono na rysunku 101.



Rys. 101. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie V.

Jak można zauważyć z uzyskanych wyników, 5 rząd wielomianu jest wystarczająco wysoki dla aproksymacji przebiegów w II, III i IV fazie pracy układu, natomiast złożoność przebiegu w fazie V wymaga zastosowania wielomianu wyższego rzędu, co z kolei doprowadzi do zwiększenia rozmiaru analizowanego zbioru danych.

W tabelach 3 do 6 przedstawiono współczynniki wielomianów dla wszystkich przyjętych wariantów. Wyniki ich oszacowania poddano normalizacji dla ułatwienia procesu klasteryzacji. Dla każdej z faz pojedynczy wiersz tabeli zawiera wartości współczynników wielomianu aproksymującego dla jednego przebiegu sił.

Tabela 3. Wartości współczynników wielomianów dla przebiegów w fazie II

Nr analizy	Współczynniki wielomianów aproksymujących					
C1	-0,016500124	0,13474665	-0,43444444	0,69103657	-0,53606386	0,16713202
C2	-0,018204991	0,14324191	-0,44684477	0,69157664	-0,52444304	0,16174467
C3	-0,017466587	0,13979614	-0,44229921	0,69153226	-0,52898749	0,16272286
C4	-0,019789436	0,15221732	-0,46271264	0,69554769	-0,50559914	0,15138755
C5	-0,017304821	0,13865122	-0,43991937	0,6908578	-0,53151827	0,16477606
C6	0,03071518	-0,20406022	0,53248786	-0,67946995	0,44887819	-0,10344874
C7	-0,017258596	0,13840138	-0,43950743	0,69080715	-0,53190789	0,16504515

C8	0,040192849	-0,24894508	0,59121466	-0,65910489	0,38616127	-0,057760988
C9	0,016455972	-0,13560701	0,43814192	-0,69204983	0,53357028	-0,16044124
C10	0,016132026	-0,13038593	0,42045662	-0,67711862	0,57201911	-0,14233765
C11	-0,017951812	0,14189612	-0,44454011	0,69020729	-0,52846352	0,16207255
C12	-0,020711899	0,15728674	-0,47146863	0,69700941	-0,4960543	0,1437263
C13	-0,016780929	0,13589248	-0,43527919	0,6892253	-0,5375288	0,16677808
C14	-0,011730864	0,10684821	-0,38499697	0,68699348	-0,56974514	0,20893447

Tabela 4. Wartości współczynników wielomianów dla przebiegów w fazie III

C1	-0,0033588229	0,043249146	-0,22144546	0,56355944	-0,70982744	0,35724769
C2	0,0023274736	-0,033304722	0,18814701	-0,52519519	0,72774341	-0,39754952
C3	0,0021760638	-0,031633979	0,18186071	-0,51723919	0,72989168	-0,40699263
C4	-0,0086988127	0,0924169	-0,37506329	0,70929573	-0,57302885	0,13873887
C5	0,0012980039	-0,022876827	0,15134827	-0,47965771	0,74164363	-0,4432402
C6	0,0028690482	-0,038432642	0,20499787	-0,54419406	0,71924594	-0,37819132
C7	0,0013032837	-0,022929365	0,15153112	-0,47988406	0,7415832	-0,44303105
C8	0,003408524	-0,044500949	0,22819162	-0,57372178	0,70808461	-0,33970005
C9	-0,0019649068	0,028990378	-0,1709511	0,50309147	-0,73367927	0,422546
C10	0,0014102149	-0,022957704	0,14764313	-0,46924179	0,73927078	-0,45930744
C11	0,0022260048	-0,032059362	0,18294646	-0,51727774	0,72884493	-0,40829724
C12	0,0015856661	-0,02590169	0,16233867	-0,49336398	0,7369153	-0,43188026
C13	-0,0030901432	0,04078384	-0,21382128	0,55637594	-0,71488091	0,36331624
C14	-0,0018640519	0,027917833	-0,16673569	0,49626961	-0,73395033	0,43179824

Tabela 5. Wartości współczynników wielomianów dla przebiegów w fazie IV

C1	0,00075958069	-0,014167541	0,10563176	-0,39353232	0,73256463	-0,54508899
C2	0,00084570608	-0,015367047	0,11161777	-0,40509474	0,73461005	-0,53249502
C3	0,00077114225	-0,014330092	0,10645117	-0,39513512	0,73287332	-0,54334808
C4	0,00094562067	-0,016718123	0,11815231	-0,4172404	0,73622735	-0,51926812
C5	0,00078562284	-0,014536268	0,10750463	-0,39722816	0,73329925	-0,54102942
C6	0,00095555208	-0,016849379	0,11877145	-0,41835514	0,73633795	-0,51806749
C7	0,00078080319	-0,014468686	0,10716501	-0,39656678	0,7331765	-0,54174968
C8	0,0009335496	-0,016558608	0,11740032	-0,41588772	0,7360924	-0,52071824
C9	-0,00064272072	0,012492925	-0,09701277	0,37622164	-0,72865672	0,56386941
C10	0,00053265054	-0,010819976	0,08786011	-0,35647896	0,72266161	-0,58553069
C11	0,00076361614	-0,014221575	0,10589029	-0,39400761	0,73263343	-0,54460139
C12	0,00082656621	-0,015109265	0,11037685	-0,40279875	0,73429337	-0,53493401
C13	0,00076413174	-0,014228441	0,10592224	-0,39406259	0,73263635	-0,54455129
C14	-0,00056237928	0,011266232	-0,09026968	0,36160299	-0,72418993	0,5801003

Tabela 6. Wartości współczynników wielomianów dla przebiegów w fazie V

C1	-0,00048208848	0,010019702	-0,083282828	0,34605066	-0,71880058	0,59710804
C2	0,00053421945	-0,010840935	0,087955996	-0,35663302	0,72265502	-0,58543022
C3	0,00046632548	-0,0097685185	0,081836139	-0,34272651	0,71752295	-0,60075499
C4	-0,00058508838	0,011612993	-0,092179359	0,36576348	-0,72551159	0,57551522
C5	-0,00047720082	0,0099426036	-0,082843388	0,34505254	-0,71842772	0,59819583
C6	0,00057950366	-0,01152975	0,091732912	-0,36482116	0,72524152	-0,57652585
C7	-0,00047577217	0,009919751	-0,082711253	0,34474765	-0,71830958	0,59853206
C8	0,00056192232	-0,011260238	0,090242983	-0,36156228	0,72419584	-0,58012257

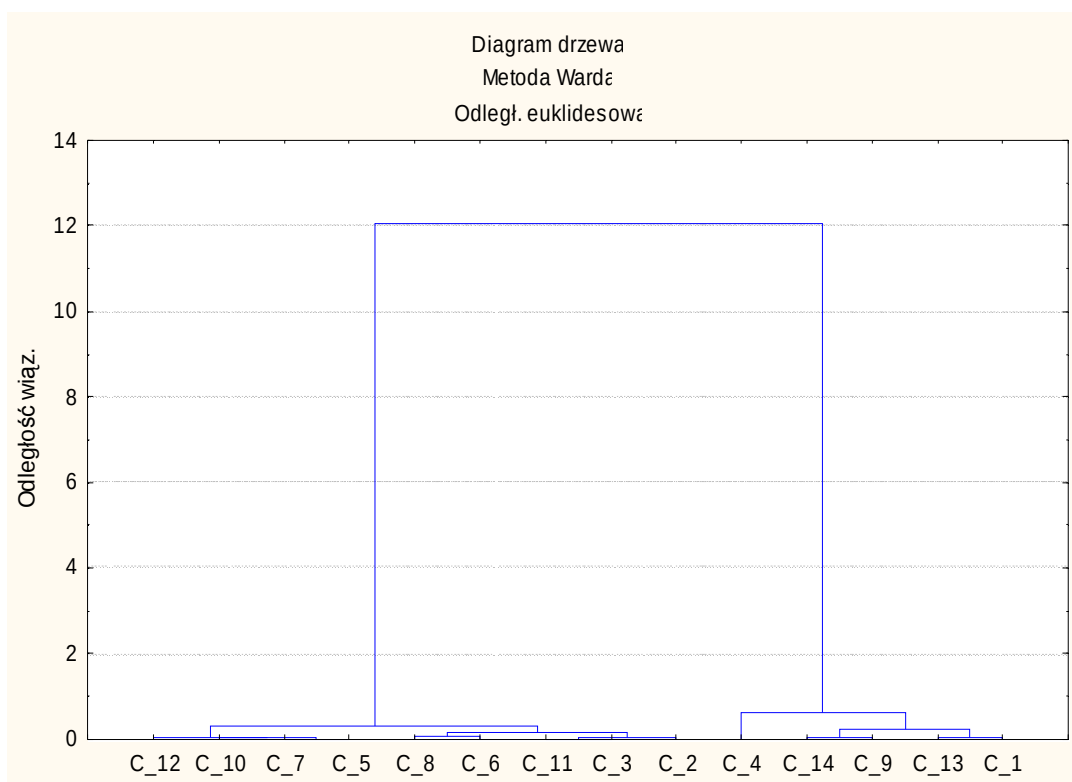
C9	-0,00048465374	0,010060012	-0,08351187	0,34656959	-0,71899326	0,59654216
C10	-0,00033304773	0,0075536457	-0,068492255	0,31036647	-0,70284554	0,63634302
C11	-0,0004939201	0,010208834	-0,084375515	0,34856954	-0,71976306	0,59432039
C12	-0,00047960818	0,0099771591	-0,083019254	0,34539725	-0,7185029	0,59788155
C13	-0,00048008952	0,0099859971	-0,083077289	0,34554911	-0,71857904	0,59769406
C14	-0,00033077982	0,0075107272	-0,068198806	0,30955394	-0,70236096	0,63730513

7.1.1 Metoda Warda

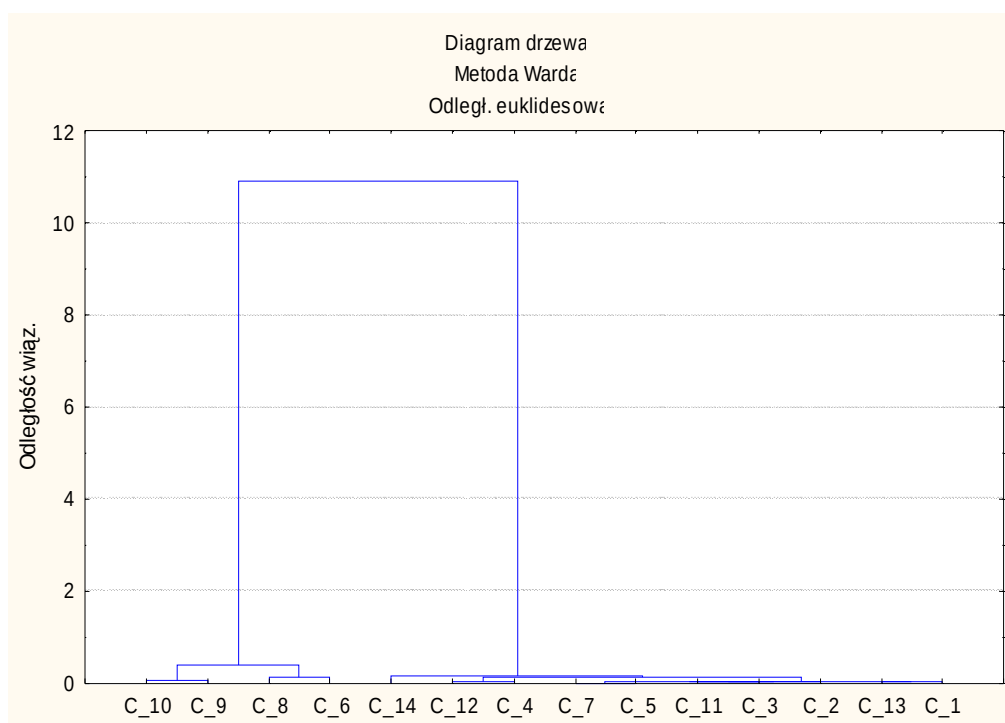
Podjmując próbę automatyzacji wykrywania awarii elementów rozjazdów konieczne jest przeprowadzenie analizy danych pod kątem ich użyteczności diagnostycznej. W pierwszym etapie przystąpiono do określenia ilości grup występujących w danych. W analizach założono brak informacji o ilości grup – posiadane dane pomiarowe nie zawsze są skorelowane z informacjami na temat stanu technicznego zwrotnicy. Przebiegi sił nastawczych zakwalifikowane do tej samej grupy mogą być charakterystyczne dla różnych usterek. Ilość grup sugeruje ile usterek można wyróżnić na podstawie zgromadzonych danych. Do grupowania zaproponowano metodę Warda. Metoda ta jest metodą z grupy hierarchicznych metod aglomeracyjnych [25]. Tego typu metody pozwalają na określenie tzw. hierarchii drzewkowej elementów analizowanego zbioru. Drzewo połączeń otrzymuje się poprzez krokowe łączenie w podzbiory operacyjnych jednostek taksonomicznych. Na wstępie przyjmuje się, że każdy element zbioru (wektor współczynników wielomianu) stanowi taką jednostkę. W utworzonej macierzy odległości między jednostkami, wyszukuje się najmniejszego elementu pośród leżących poza przekątną. Jest to odległość aglomeracyjna, minimalna w sensie „lokalnym”. Wskazane przez nią jednostki zostają połączone tworząc nową jednostkę (grupę). Następnie korygowana jest macierz odległości i procedura jest powtarzana. Warunkiem stopu jest uzyskanie jednej jednostki taksonomicznej. Metoda Warda różni się od pozostałych metod sposobem szacowania odległości między jednostkami taksonomicznymi. Wykorzystuje ona analizę wariancji – zmierza do minimalizacji sumy kwadratów odchyłeń elementów dowolnych dwóch skupień, które są tworzone na każdym etapie aglomeracji. Zaletą wybranej metody jest brak konieczności arbitralnego definiowania ilości grup w analizowanych danych oraz o

40% lepsza efektywność wykrywania prawdziwej struktury danych niż w innych metodach [23].

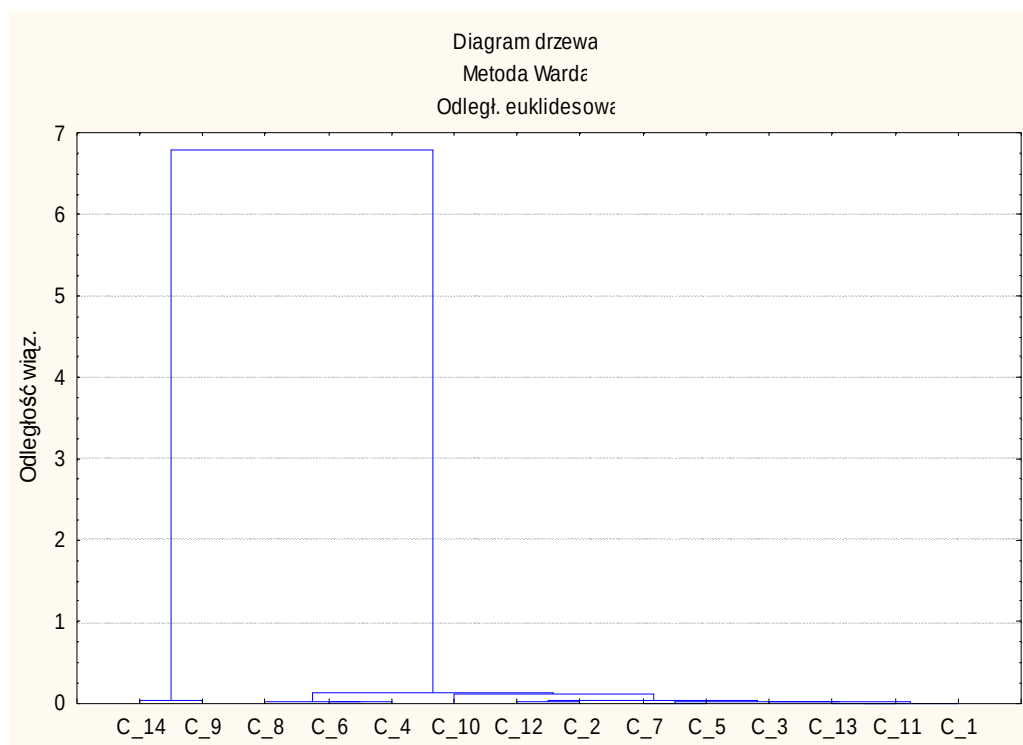
W analizowanym przypadku elementem zbioru jest wektor zawierający zestaw współczynników wielomianu aproksymującego. Uzyskane wyniki grupowania metodą Warda dla każdej fazy osobno przedstawiono na rysunkach od 102 do 105. Dla fazy II wyróżniono dwie grupy skupisk pokazanych na rysunku 102. Dla fazy III, IV i V podobnie wyróżniono dwie grupy, choć inne przypadki stanowią skupiska. Grupy dla tych skupisk pokazano odpowiednio na rysunkach 103, 104 i 105. Na osi X zaznaczono numery analizowanych przypadków, na osi Y zaznaczono odległość aglomeracyjną. Jej wartość stanowi miarę „niepodobieństwa” grup znajdujących się w sąsiednich gałęziach drzewa, a które zostały połączone w jedną grupę w kolejnym kroku aglomeracji. Analizując wyniki grupowania na rysunku 102 można stwierdzić, że przypadki (opisane w tabeli jako numer analizy C_nr_porządkowy) można podzielić na dwie grupy, których miara „niepodobieństwa” (odległość wiązania) wynosi 12. Ilość grup określa się dokonując przecięcia drzewa aglomeracji (linią poziomą) na założonym poziomie „niepodobieństwa” i zliczając ilość przeciętych gałęzi. Zawartość tak uzyskanych grup odczytuje się na osi X. Dla rozpatrywanego przypadku, przy przecięciu na poziomie 1 uzyskano 2 grupy: grupa 1 – przypadki C12, C10, C7, C5, C8 C6 C11, C3, C2; grupa 2 – C4, C14, C9, C13, C1. Dodatkowo, obserwując poziom łączenia poszczególnych przypadków, można wnioskować o dużym ich podobieństwie, jeśli poziom ten jest niski. Na przykład dla fazy II najtrudniejsze do odróżnienia od siebie są przypadki C5 i C7, bo ich odległość aglomeracyjna jest najmniejsza.



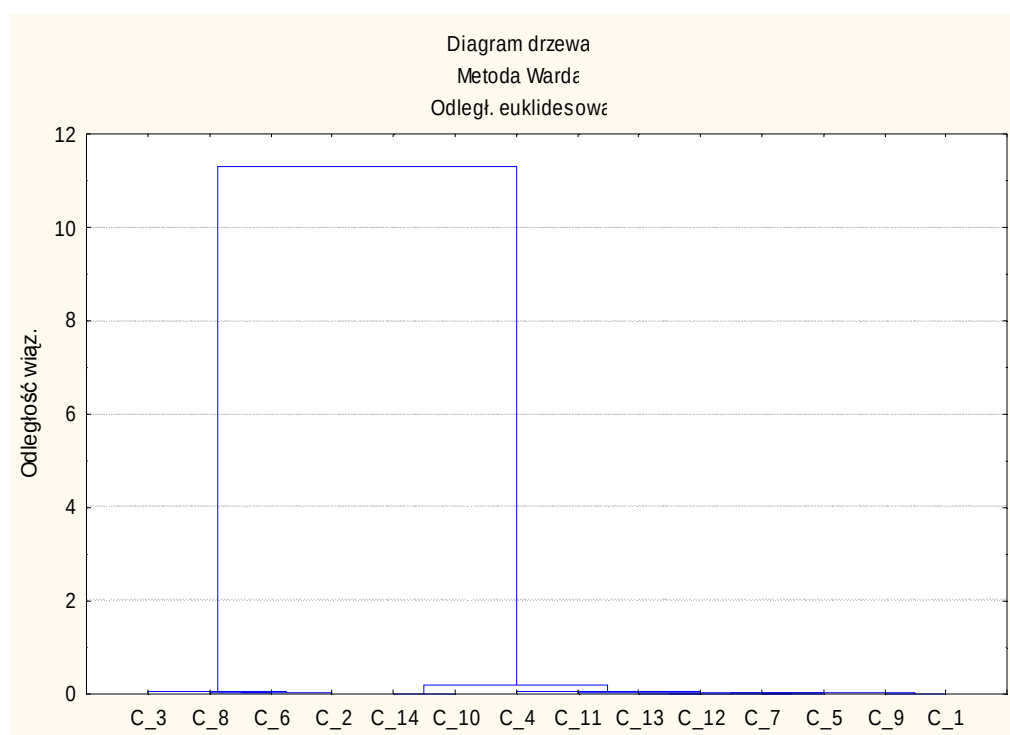
Rys. 102. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy II



Rys. 103. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy III

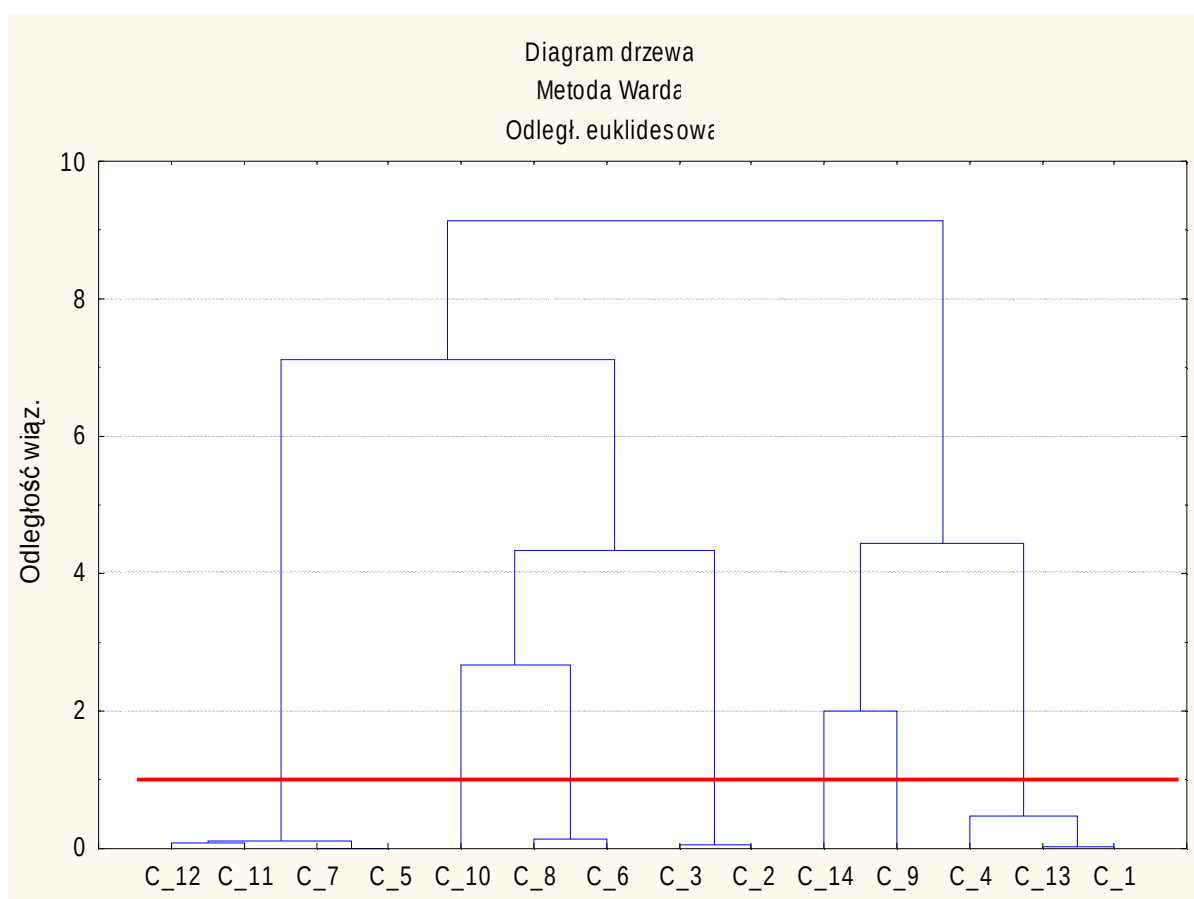


Rys. 104. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy IV



Rys. 105. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy V

Z powyższej analizy danych można stwierdzić, że posługując się osobno współczynnikami dla poszczególnych faz znaleziono tylko dwie grupy w danych. Zawartość wyróżnionych grup jest dla każdej fazy inna. Na tej podstawie nie można, więc postawić wniosków odnośnie możliwości określania stanu technicznego rozpatrywanego urządzenia. Konieczna jest, zatem jednoczesna analiza współczynników wielomianów dla wszystkich faz. Na rysunku 106 przedstawiono wyniki grupowania dla wektora wejściowego zawierającego wszystkie współczynniki wielomianów.



Rys. 106. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla wszystkich współczynników.

Dokonując przecięcia drzewa Warda na poziomie odległości wiązania, równej jeden, uzyskujemy siedem grup danych. Z rysunku 106 można odczytać, które przypadki należą do tej samej grupy. Interpretując zawartość grup zgromadzone dane pozwalają na wykrywanie następujących pojedynczych uszkodzeń: C10, C14, C9, a także wykrycie wystąpienia jednego lub obu uszkodzeń C6 lub C8 (bez wskazania,

które to uszkodzenie), podobnie C3 lub C2. Zakwalifikowanie danych do jednej z pozostałych grup musi zostać zinterpretowane jako wystąpienie awarii C12, lub C11 lub C7 lub C5 dla grupy zawierającej odpowiadające im dane oraz awarii C1 lub C13, lub C4.

Po analizie wyników grupowania dla poszczególnych faz należy stwierdzić, że nie można na tej podstawie dokonać dodatkowego podziału zidentyfikowanych powyżej grup.

7.1.2 Algorytm k-średnich

Z punktu widzenia automatyzacji procesu wykrywania uszkodzeń układu napęd-zwrotnica konieczne jest zbudowanie efektywnego klasyfikatora [46] dokonującego określenia przynależności dostarczonych danych pomiarowych do jednej ze zdefiniowanych grup, a co za tym idzie wskazania uszkodzenia lub grupy uszkodzeń. Do realizacji takiego zadania wykorzystano inną technikę grupowania danych, jaką jest algorytm k-średnich [46].

Wykorzystano ten sam zestaw danych przykładowych, co w metodzie aglomeracyjnej. Wymogiem algorytmu jest podanie ilości (k) grup, na które dokona on podziału – na podstawie poprzednich rozważań określono ją na siedem ($k=7$).

Algorytm przebiega następująco:

1. wybiera losowo z danych, k przykładów i traktuje je, jako początkowe środki grup
2. dla każdego elementu zbioru danych znajduje najbliższy (w sensie metryki) środek grupy – wynikiem jest wstępny podział danych (każdy przykład można przypisać do grupy reprezentowanej przez najbliższy środek)
3. dla każdej grupy oblicza centroid (np. środek ciężkości) i traktuje go jako nowy środek grupy
4. powtarza kroki od 2 do 3 aż zostanie spełniony warunek zbieżności lub położenie środków grup nie ulegają zmianie.

Warunkiem zbieżności jest brak istotnej zmiany sumy kwadratów odległości elementów grupy od jej środka. Wynikiem działania algorytmu jest określenie, jakie przypadki tworzą poszczególne grupy oraz informacja o wzorcach danych

charakterystycznych dla każdego ze skupisk (są nimi wartości średnich każdego skupiska, czyli współrzędne ich środków) [45].

Wyniki grupowania metodą k-średnich dla przyjętego zestawu danych przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki grupowania metodą k-średnich

Elementy skupienia numer 1 (wielonormal) i odległości od środka właściwego skupienia Skupien. zawiera 1 przyp	
Nr przypadku	Odlegl.
C_14	0,00

Elementy skupienia numer 2 (wielonormal) i odległości od środka właściwego skupienia Skupien. zawiera 1 przyp	
Nr przypadku	Odlegl.
C_9	0,00

Elementy skupienia numer 3 (wielonormal) i odległości od środka właściwego skupienia Skupien. zawiera 2 przyp	
Nr przypadku	Odlegl.
C_2	0,003220
C_3	0,003220

Elementy skupienia numer 4 (wielonormal) i odległości od środka właściwego skupienia Skupien. zawiera 3 przyp	
Nr przypadku	Odlegl.
C_1	0,022558
C_4	0,047696
C_13	0,025149

Elementy skupienia numer 5 (wielonormal) i odległości od środka właściwego skupienia Skupien. zawiera 4 przyp	
Nr przypadku	Odlegl.
C_5	0,005339
C_7	0,005379
C_11	0,008736
C_12	0,008382

Elementy skupienia numer 6 (wielonormal) i odległości od środka właściwego skupienia Skupien. zawiera 1 przyp	
Nr przypadku	Odlegl.
C_10	0,00

		Elementy skupienia numer 7 (wielonormal) i odległości od środka właściwego skupienia Skupien. zawiera 2 przyp			
Nr przypadku	Odlegl.				
C_6	0,012535				
C_8	0,012535				

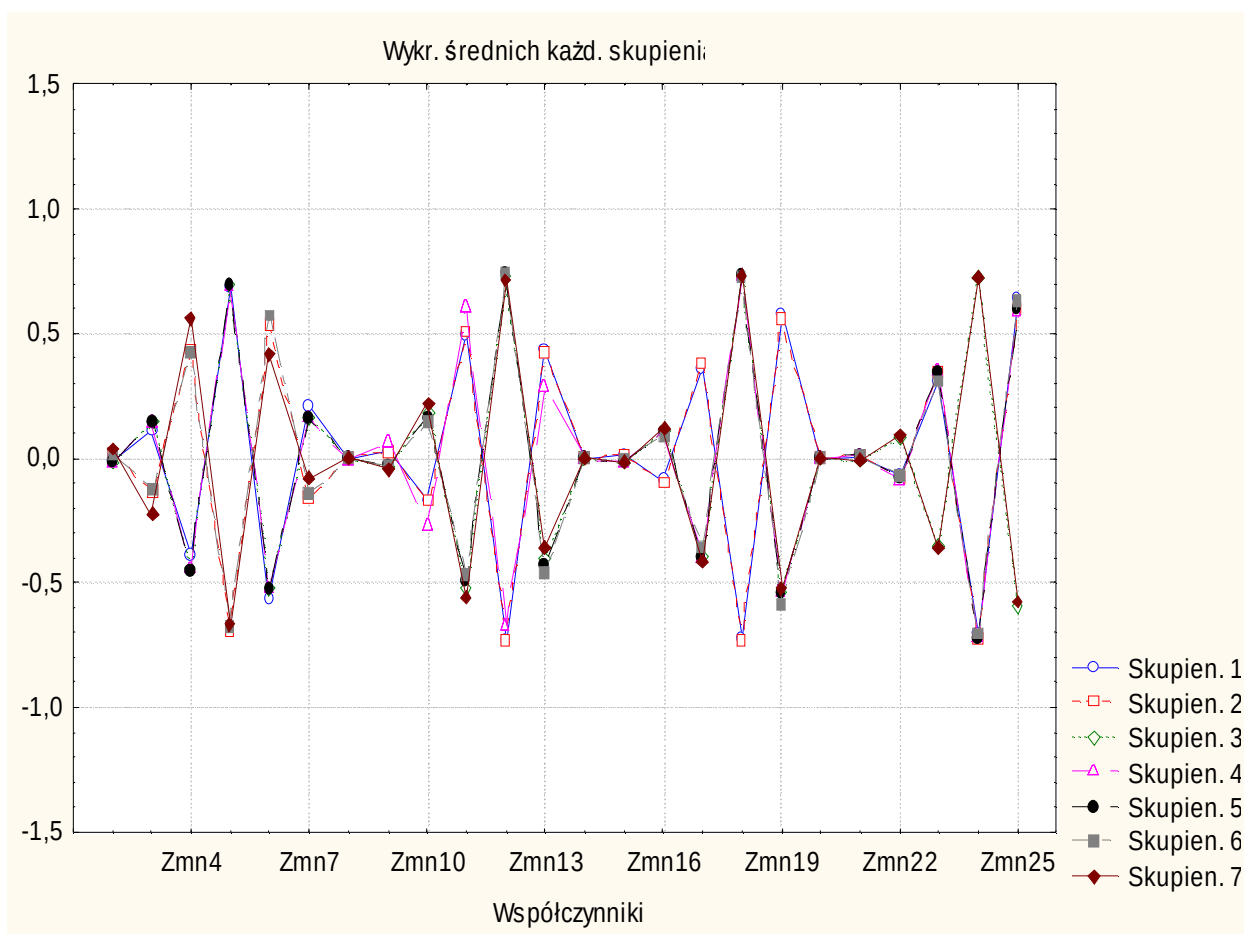
Otrzymane wyniki wykazują zgodność z wynikami metody Warda – składnikami grup są te same przypadki analizy.

Uzyskane wzorce dla poszczególnych skupień – zestawy wzorcowych wartości współczynników wielomianów aproksymujących przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Zestaw wzorcowych wartości współczynników wielomianów aproksymujących

Zmienna	Średnie skup. (wielonormal)						
	Skupien. Nr 1	Skupien. Nr 2	Skupien. Nr 3	Skupien. Nr 4	Skupien. Nr 5	Skupien. Nr 6	Skupien. Nr 7
Zmn2	-0,011731	0,016456	-0,017836	-0,017690	-0,018307	0,016132	0,035454
Zmn3	0,106848	-0,135607	0,141519	0,140952	0,144059	-0,130386	-0,226503
Zmn4	-0,384997	0,438142	-0,444572	-0,444145	-0,448859	0,420457	0,561851
Zmn5	0,686994	-0,692050	0,691554	0,691936	0,692220	-0,677119	-0,669287
Zmn6	-0,569745	0,533570	-0,526715	-0,526397	-0,521986	0,572019	0,417520
Zmn7	0,208935	-0,160441	0,162234	0,161766	0,158905	-0,142338	-0,080605
Zmn8	-0,001864	-0,001965	0,002252	-0,005049	0,001603	0,001410	0,003139
Zmn9	0,027918	0,028990	-0,032469	0,058817	-0,025942	-0,022958	-0,041467
Zmn10	-0,166736	-0,170951	0,185004	-0,270110	0,162041	0,147643	0,216595
Zmn11	0,496270	0,503092	-0,521217	0,609744	-0,492546	-0,469242	-0,558958
Zmn12	-0,733950	-0,733679	0,728818	-0,665912	0,737247	0,739271	0,713665
Zmn13	0,431798	0,422546	-0,402271	0,286434	-0,431612	-0,459307	-0,358946
Zmn14	-0,000562	-0,000643	0,000808	0,000823	0,000789	0,000533	0,000945
Zmn15	0,011266	0,012493	-0,014849	-0,015038	-0,014584	-0,010820	-0,016704
Zmn16	-0,090270	-0,097013	0,109035	0,109902	0,107734	0,087860	0,118086
Zmn17	0,361603	0,376222	-0,400115	-0,401612	-0,397650	-0,356479	-0,417121
Zmn18	-0,724190	-0,728657	0,733742	0,733810	0,733351	0,722662	0,736215
Zmn19	0,580100	0,563869	-0,537922	-0,536303	-0,540579	-0,585531	-0,519393
Zmn20	-0,000331	-0,000485	0,000500	-0,000516	-0,000482	-0,000333	0,000571
Zmn21	0,007511	0,010060	-0,010305	0,010540	0,010012	0,007554	-0,011395
Zmn22	-0,068199	-0,083512	0,084896	-0,086180	-0,083237	-0,068492	0,090988
Zmn23	0,309554	0,346570	-0,349680	0,352454	0,345942	0,310366	-0,363192
Zmn24	-0,702361	-0,718993	0,720089	-0,720964	-0,718751	-0,702846	0,724719
Zmn25	0,637305	0,596542	-0,593093	0,590106	0,597233	0,636343	-0,578324

Graficzną prezentację uzyskanych wzorców pokazano na rysunku 107.



Rys. 107. Wyniki grupowania metodą k-średnich

W oparciu o tak określone wzorce można zbudować klasyfikator badający różnice pomiędzy danymi charakterystycznymi dla ocenianego układu a wzorcami. Najmniejsza wartość różnicy umożliwia wykrycie wzorca i skojarzonego z nim najbardziej prawdopodobnego stanu awaryjnego.

7.1.3 Sieć neuronowa

Ponieważ znajdowanie ukrytych wzorców w dużej ilości danych, w tym przypadku wzorców charakterystycznych dla zmian sił nastawczych napędu w zależności od typu uszkodzenia, jest jednym z celów realizowanych przez sieci neuronowe podjęto próbę opracowania algorytmu detekcji wspomaganego tymi metodami. Do realizacji tego zadania wybrano sieci neuronowe typu Kohonena uczonych bez nauczyciela [40],[72]. Zastosowanie tych sieci neuronowych w wersji samoorganizujących się map cech, łączy w sobie zalety wykorzystanych wcześniej

metod, gdyż dokonują one przekształcenia danych wejściowych z przestrzeni wielowymiarowej do przestrzeni o mniejszym wymiarze, przeprowadzają grupowanie danych (wykrywają strukturę danych) oraz ich działanie nosi cechy klasyfikatora danych. Ponadto śledzenie wyników klasyfikacji dla kolejnych chwil czasowych, prezentowane w sposób graficzny, ułatwia obserwację przebiegu zmian stanu diagnozowanego obiektu. Najbardziej interesującą cechą sieci neuronowych jest zdolność do generalizacji tzn. poprawnego interpretowania danych wejściowych także w przypadku, gdy różnią się one od danych wykorzystanych w procesie uczenia [24],[26]. W kontekście klasyfikacji poprawnie przygotowana sieć neuronowa Kohonena zawiera zidentyfikowane wzorce w postaci zestawu wag połączeń aktywnych neuronów. Sieć jest klasyfikatorem wielowzorcowym tzn. do wykrywania przynależności danych do pewnej grupy może być wykorzystanych więcej wzorców niż jeden. Zapewnia to lepsze pokrycie przestrzeni zmienności danych i większą dokładność klasyfikacji. Charakterystyczną cechą sieci neuronowych Kohonena typu mapy cech (ang. Self Organizing Feature Maps) jest wprowadzenie pewnej topologii rozmieszczenia neuronów np. na płaszczyźnie [72]. Neurony są umieszczone w węzłach odpowiednio zdefiniowanej sieci, której przykład pokazano na rysunku 108. Połączenia prezentowane na rysunku są ilustracją topologii sąsiedztwa neuronów w sieci. Zdefiniowanie sąsiedztwa pozwala na wprowadzenie pewnego uporządkowania neuronów już na etapie uczenia. W odróżnieniu od klasycznej sieci typu Kohonena, uczeniu, czyli poprawianiu wartości wag połączeń, podlegają także neurony należące do sąsiedztwa neuronu zwycięskiego [72]. Zmiana wag neuronów sieci następuje według wzorów [2] podanych poniżej.

$$w_{ni}(t) = w_{ni}(t-1) + \eta \bullet (x(t-1) - w_{ni}(t-1))$$

oraz

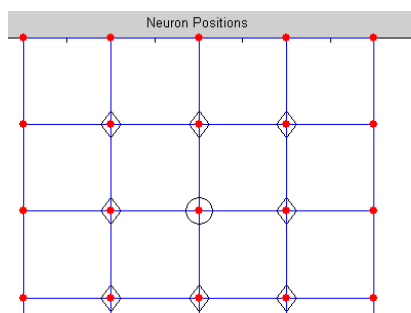
[2]

$$w_{nj}(t) = w_{nj}(t-1) + 0,5\eta \bullet (x(t-1) - w_{nj}(t-1))$$

dla $j \in \epsilon_i$

gdzie:

 w_{ni} – waga n-tego połączenia zwycięskiego neuronu i, ϵ_i - sąsiedztwo neuronu i, $x(t-1)$ – wektor wejściowy sieci, η - współczynnik uczenia.



Rys. 108. Przykład sieci neuronowej z węzłami rozmieszczonymi na płaszczyźnie

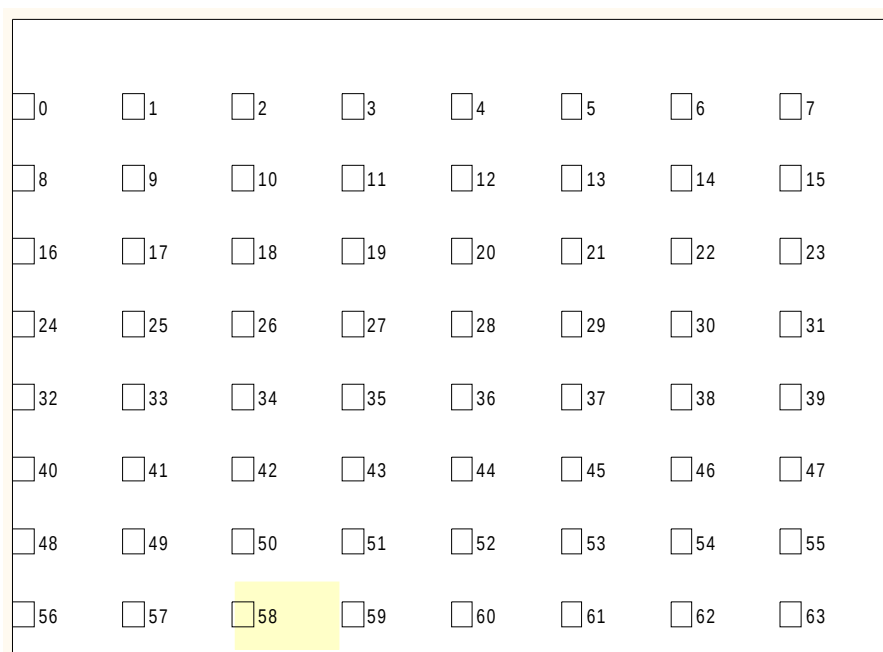
Taka modyfikacja procesu uczenia pozwala zgromadzić w pewnym regionie mapy neurony reagujące na podobne wartości sygnałów wejściowych [40].

Przystępując do budowy sieci neuronowej utworzono mapę o rozmiarze 8 x 8 składającą się z 64 neuronów. Wejście stanowiły pełne zestawy współczynników wielomianów aproksymujących, tak jak w metodach prezentowanych poprzednio.

Po przeprowadzeniu procesu uczenia przystąpiono do testowania działania sieci. Odpowiedź sieci neuronowej na zadane wejście ma format wektora, którego elementy mają wartości zerowe z wyjątkiem elementu odpowiadającego zwycięskiemu neuronowi. W wersji graficznej możliwe jest obserwowanie aktywności wszystkich neuronów przed wykonaniem funkcji konkursowej i określeniu neuronu zwycięskiego. Pozwala to na określenie regionów mapy, wewnątrz których aktywność neuronu interpretowana jest jako wykrycie skojarzonej z tym regionem awarii. Struktura sieci Kohonena pozwala na automatyzację procesu klasyfikacji stanu obiektu. W etapie wstępnym przeprowadzany jest proces uczenia sieci neuronowej na przykładach zgromadzonych w ciągu uczącym. Te same dane uczące wykorzystywane są do określenia regionów mapy charakterystycznych dla stanów maszyny. W sieci neuronowej typu Kohonena każdy z neuronów ma swój numer, który identyfikuje jednoznacznie także jego położenie na mapie. Zatem określenie regionów sprowadza się do znalezienia i umieszczenia w zbiorze wyliczeniowym numerów neuronów do nich należących. Automatyzacja procesu klasyfikacji polega na obliczeniu odpowiedzi sieci w postaci numeru aktywnego neuronu oraz określenia jego przynależność do regionu. Determinuje ją relacja zawierania się numeru aktywnego neuronu w zbiorze numerów neuronów definiujących region. Jeżeli relacja ta nie jest spełniona zasygnalizowany zostaje stan nieokreślony.

Poniżej przedstawiono wyniki działania sieci neuronowej Kohonena przygotowanej do rozwiązywania zadania wykrywania awarii układu napęd-zwrotnica.

Pierwszy region na mapie składa się z jednego neuronu o numerze 58, który wykrywa grupę uszkodzeń: C1, C4, C13. Pokazano to na rysunku 109.



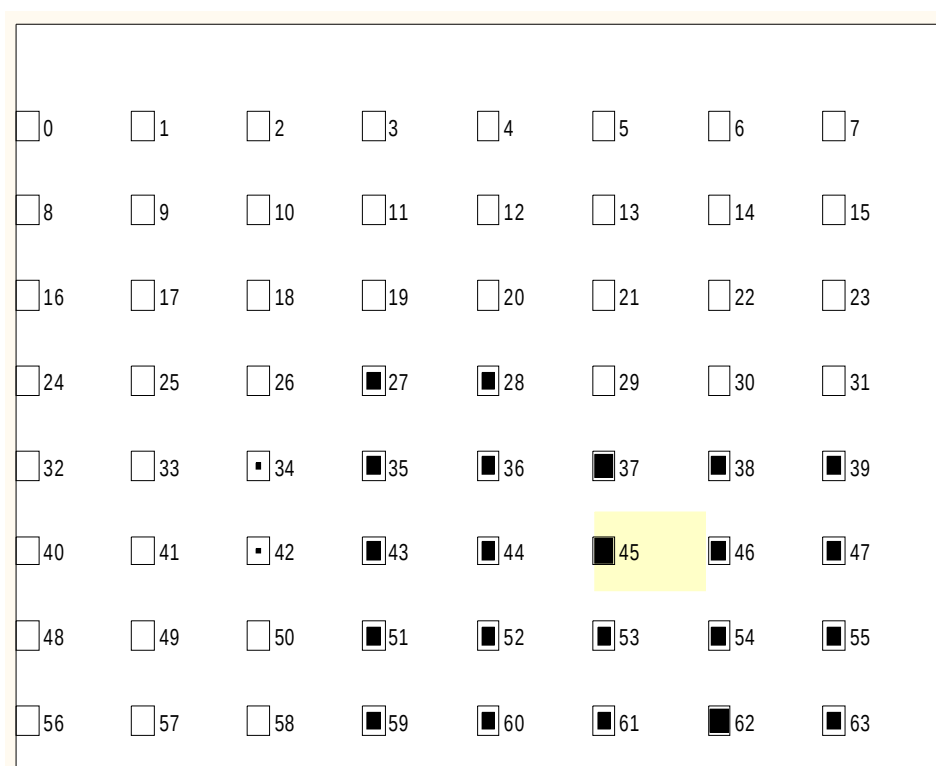
Rys. 109. Region dla grupy uszkodzeń C1, C4 i C13.

Dla danych wejściowych reprezentujących uszkodzenia typu C2 lub C3 stan wysoki wykazywały neurony zaznaczone zaczernieniem na rysunku 110. Oznacza to, że jeśli w przypadku oceny stanu technicznego rozpatrywanego układu, zmierzone dla niego dane spowodują aktywność jednego z neuronów z tego regionu mapy to należy to interpretować jako wykrycie awarii typu C2 lub C3. Ilość neuronów wykorzystywanych do wykrycia awarii tego typu jest związana ze zmiennością danych je charakteryzujących – im większa różnorodność danych ilustrujących te awarie tym więcej neuronów musi być wykorzystywanych.



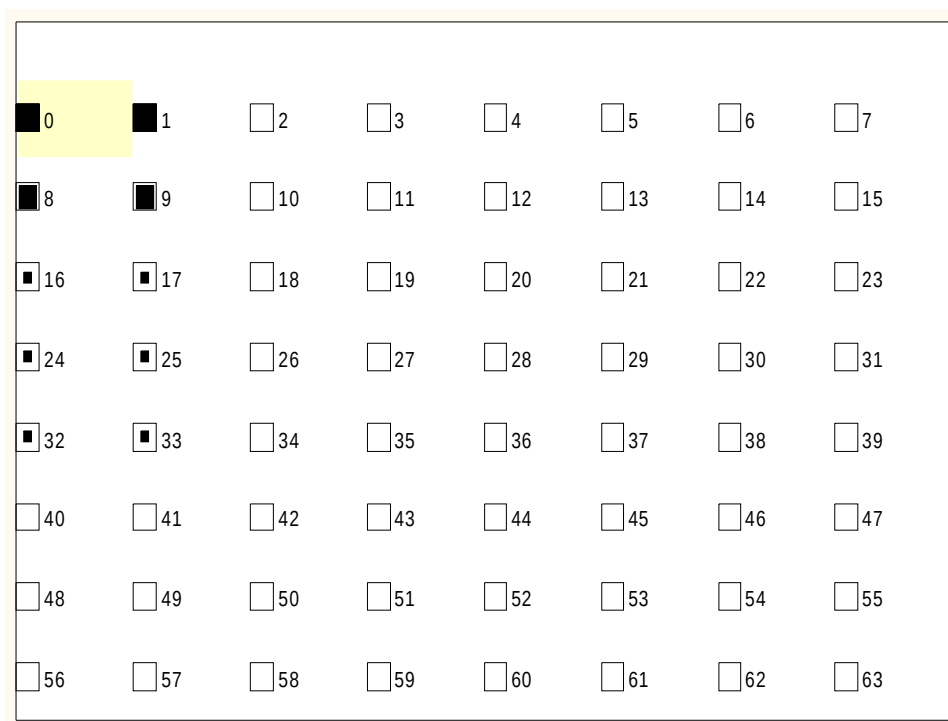
Rys. 110. Region dla grupy uszkodzeń C2 i C3.

Kolejna grupa angażuje najwięcej neuronów, ale związana jest to także z największym zestawem awarii (C5, C7, C11 i C12). Dla tych awarii stan wysoki wykazywały neurony zaznaczone zaczerzeniem na rysunku 111.



Rys. 111. Region dla grupy uszkodzeń C5, C7, C11 i C12.

Kolejna grupa identyfikowana jest przez neurony z regionu mapy zaznaczonego zaczerznięciem przedstawione na rysunku 112. Reagują one na dane zarejestrowane dla awarii typu C6 lub C8.



Rys. 112. Region dla grupy uszkodzeń C6 i C8.

Dla uszkodzeń typu C9 i C10 reagują odpowiednio pojedyncze neurony nr 48 i 26.

Natomiast dla przypadku awarii typu C14 reaguje kolejna część mapy zaznaczona na czarno na rysunku 113.



Rys. 113. Region dla uszkodzenia C14.

Podsumowując rezultaty uzyskane za pomocą sieci neuronowej Kohonena typu mapy cech można wskazać zgodność wyników grupowania, co w metodzie aglomeracyjnej. Wyróżniono 7 grup, które zawierają te same elementy, zatem ilość wykrywanych uszkodzeń przez sieć neuronową jest na tym samym poziomie, co w poprzednich metodach. W zakresie wykrywania uszkodzeń układu napęd-zwrotnica, opracowana sieć jest jednocześnie klasyfikatorem stanu technicznego. Jego działanie opiera się na danych charakteryzujących badany układ, podawanych w postaci wektora na wejście sieci. Obserwując aktywność neuronów pobudzanych wektorami wejściowymi (tzn. notując ich numery) i sprawdzając ich przynależność do wyróżnionych obszarów mapy lub zgodność z numerami pojedynczych neuronów odpowiedzialnych za określenie przynależności do pewnej grupy można dokonać automatycznie klasyfikacji analizowanych danych. Pozwala to wnioskować o wystąpieniu nieprawidłowości oraz jej typie lub ich liście.

7.2. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych analiz pozwalają sądzić, iż zaproponowane procedury diagnozowania stanu układu napęd zwrotnicowy – zwrotnica, pierwsza oparta o metodę Warda oraz k-średnich oraz druga wykorzystująca sieć neuronową Kohonena typu mapy cech, umożliwiają automatyczną detekcję uszkodzeń rozpatrywanego układu.

Podsumowując uzyskane rezultaty można wskazać na zgodność wyników grupowania oraz ich elementów we wszystkich zastosowanych metodach. Wyróżniono 7 grup, które zawierają te same elementy, zatem ilość wykrywanych uszkodzeń przez sieć neuronową jest na tym samym poziomie, co w metodach aglomeracyjnych.

Ponieważ w zakresie wykrywania uszkodzeń układu napęd-zwrotnica, sieć neuronowa przeprowadza grupowanie danych oraz jest jednocześnie klasyfikatorem stanu technicznego, dlatego zastosowano ją w czasie implementacji systemu SDK.

Należy zaznaczyć jednak, że opracowane procedury muszą zostać zweryfikowane na rzeczywistych danych pomiarowych pochodzących z napędów eksploatowanych w terenie. Taka eksploatacja jest prowadzona a zbierane dane umożliwią końcową weryfikację opracowanego systemu.

8. Podsumowanie i wnioski

Napędy zwrotnicowe i zwrotnice są elementami sieci kolejowej, które jak wykazały badania niezawodności tych elementów przeprowadzone przez autora, dość często ulegają awarii, co negatywnie wpływa na punktualność pociągów i są źródłem dość wysokich kosztów serwisu i utrzymania. Układy te wykazują stosunkowo dużą zawodność zwłaszcza w warunkach zimowych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz, symulacji i testów ustalono, iż monitorowanie siły oporów przestawiania zwrotnicy, jakie napęd zwrotnicowy musi pokonać w czasie przestawiania może posłużyć jako symptom diagnostyczny na potrzeby systemu monitorowania i diagnostyki stanu technicznego układu napęd-zwrotnica.

Wyznaczony za pomocą modułu pomiarowego EKD-1 przebieg siły oporów przestawiania tylko nieznacznie różni się od przebiegu sił zmierzonych czujnikiem tensometrycznym. Względny błąd średniokwadratowy wyniósł $\pm 5\%$, co pozwala w praktyce eksploatacyjnej napędów zastosować go do pośredniego pomiaru siły oporów przestawiania zwrotnicy z suwakowym zamknięciem nastawczym.

Wykonano i przetestowano w warunkach eksploatacyjnych prototyp systemu monitorowania układu napęd – zwrotnica oparty o moduł pomiarowy EKD-1. Zaproponowany system monitorowania jest oparty na uproszczonych modelach elektromechanicznych i pomiarach wielkości elektrycznych. Pozwala to na uniknięcie kłopotliwego instalowania czujników tensometrycznych w warunkach terenowych w napędzie. Umożliwia również uzyskanie informacji o początkowej fazie ruchu układu, które są niedostępne na drodze pomiarów tensometrycznych.

Zastosowanie tego systemu może podnieść dostępność i bezpieczeństwo eksploatacji tego skomplikowanego elektromechanicznego systemu, jakim jest napęd zwrotnicowy.

Wyniki przeprowadzonych analiz pozwalają sądzić, iż zaproponowana koncepcja diagnozowania stanu napędów zwrotnicowych oparta o samouczące sieci neuronowe Kohonena typu mapy cech jest poprawna, a przynajmniej bardzo perspektywiczna. Należy zaznaczyć jednak, że opracowane procedury muszą

zostać zweryfikowane na rzeczywistych danych pomiarowych pochodzących z napędów eksploatowanych w terenie. Taka eksploatacja jest prowadzona a zbierane dane umożliwią końcową weryfikację opracowanego systemu.

Na tej podstawie można stwierdzić, iż cel pracy, jakim było sformułowanie procedury diagnozowania oraz zbudowanie systemu monitorowania układu napęd zwrotnicowy – zwrotnica oraz jego przetestowanie w warunkach eksploatacyjnych został osiągnięty, a teza pracy, że jest możliwe zrealizowanie systemu diagnozowania napędu zwrotnicowego z zastosowaniem systemu opartego na metodach AI została udowodniona.

9. Literatura:

- [1] Barlow J., Proschan F.: Statistical Theory of Reliability and Life Testing. Probability Models, Holt Rinehart and Wiston Inc. N. York 1975;
- [2] Bartczak M.: Napędy zwrotnicowe a bezpieczeństwo ruchu, Prezentacja Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji CNTK Warszawa CNTK;
- [3] Batko W., Gibiec M.: Analiza przydatności sieci neuronowych w procesie prognozowania stanu maszyn. Konf. Diagnostyka Procesów Przemysłowych. Jurata-/Gdańska, 1998;
- [4] Bente H., Jost Lüking: The Cost of Railway Infrastructure – Status quo and ways head, ProM@in No. 1, November 2001;
- [5] Bris R., Litschmannova M. Simulation approach In reliability analysis of maintained systems, Proceedings of the ESREL 2000, Edinburgh, Vol. 2, p.1563-1569, Rotterdam 2000;
- [6] Cempel C.: Ewolucyjne modele symptomowe w diagnostyce maszyn. Mat. Kongresu Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996;
- [7] Cempel C.: Modele diagnostyki wibroakustycznej. DMRiP, Bydgoszcz - Borówno 1994;
- [8] Cholewa W., Kiciński J.: Diagnostyka Techniczna – Odwrotne Modele Diagnostyczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1997;
- [9] Cygan Z., Sienkiewicz P. Wojtczak J.: Metodologia badań systemów eksploatacji obiektów technicznych. Zakład Systemów Ekonomicznych, Wektory Gospodarki, Warszawa;
- [10] Dalton G., Zuber P.: Plans for the future development of rail infrastructure, ProM@in No. 1, November 2001;
- [11] Dokumentacja rozjazdu firmy Vossloh;
- [12] Dokumentacja Techniczno Ruchowa napędu EBI Switch 700, DTR-2007/EBI Switch 700, Bombardier;
- [13] Dokumentacja Techniczno Ruchowa napędu EEA-4, DTR-89/EEA-4 /2, Bombardier;
- [14] Dokumentacja Techniczno Ruchowa napędu EEA-4, DTR-89/EEA-4, Bombardier;

- [15] Dokumentacja Techniczno Ruchowa napędu EEA-5, DTR-99/EEA-5, Bombardier;
- [16] Dokumentacja Techniczno Ruchowa napędu EEA-5, DTR-99/EEA-5/1 załączniki, Bombardier;
- [17] Dokumentacja Techniczno Ruchowa napędu S700K, Siemens;
- [18] Dokumentacja Techniczno Ruchowa, DTR-2003/EBILOCK950, Komputerowy system urządzeń srk EBILOCK 950 z STC i SOL-2, Bombardier;
- [19] Firkowicz Sz., Karpiński J.: Zasady profilaktyki obiektów technicznych. WNT, Warszawa 1981;
- [20] Garbato Y., Guedes Soares.: Cost and reliability based strategies for fatigue maintenance planning of floating structures, Reliability Engineering and System Safety, vol. 73, p.293-301, 2001;
- [21] Ge M., Du R., Xu Y., Hidden Markov model based fault diagnosis for stamping processes, Mechanical Systems and Signal Processing, 18 (2004) 391-408;
- [22] Gibiec M.: Soft Computing tools for machine diagnosing, Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 3, vol. 42: 483 – 501, 2004;
- [23] Grabiński T., Sokołowski A.: The Effectiveness of Some Signal Identification Procedures, Signal Processing: Theories and Applications, North-Holland Publishing Company, EURASIP, 1980;
- [24] Hammer, B., Micheli, A., Sperduti, A., Strickert, M. (2004). Recursive self-organizing network models. Neural Networks, 17(8-9):1061-1086;
- [25] Hand D., Mannila H., Smyth P.: Principles of Data Mining, MIT Press, Cambridge. Tłum pol. Eksploracja Danych, WNT, Warszawa 2005;
- [26] Heskes, T. (2001). Self-organizing maps, vector quantization, and mixture modeling. IEEE Transactions on Neural Networks, 12:1299-1305;
- [27] http://ec.europa.eu/transport/rail/index_en.htm;
- [28] <http://promain.org>;
- [29] IM-KT/HT-25 Instrukcja utrzymania zamknięcia SZS, Koltram;
- [30] Instrukcja 2008/02/079, Bombardier;
- [31] Instrukcja diagnostyki technicznej i kontroli okresowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym, Ie-7 (E-14);

- [32] Instrukcja konserwacji i przeglądów urządzeń sterowania ruchem kolejowym, E-24, Warszawa 2000;
- [33] Instrukcja o oględzinach, badaniach technicznych i utrzymaniu rozjazdów, D6, Warszawa 1996;
- [34] Instrukcja o zasadach eksploatacji i prowadzenia robót w urządzeniach sterowania ruchem kolejowym, E11;
- [35] IRSE. (1994). Railway control and signalling system failure analysis. London, UK: Institute of Railway Signal Engineers;
- [36] Kantardzic M.: Data Mining: Concepts, Models, Methods and Algorithms, Wiley-Interscience, Hoboken NJ 2003;
- [37] Kiciński J., Markiewicz-Kicińska A., Coupled Non-Linear Vibrations in Multi-Supported Rotors Founded on Slide Bearings, Advances in Vibration Engineering, Vol. 1, No 2, The Scientific Journal of the Vibration Institute of India, pp. 141-152;
- [38] Kiciński J.: Acquisition of diagnostic knowledge based on model investigations, AI-METH 2002, Artificial Intelligence Methods, Gliwice, Poland 2002;
- [39] Kiciński J.: Nonlinear Model of Vibration in a Rotor-Bearing System, Schwingungen in rotierenden Maschinen VI, Darmstadt 2003, pp. 103-112;
- [40] Kohonen T.: The self-organizing map. Springer, Berlin Heidelberg, 1995;
- [41] Konieczny J.: Sterowanie eksploatacją urządzeń. PWN, Warszawa 1975;
- [42] Konieczny J.: Wstęp do teorii eksploatacji urządzeń. WNT, Warszawa 1971;
- [43] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: Sztuczne sieci neuronowe. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1994;
- [44] Korbicz J., Obucowicz A., Uciński D.: Sztuczne Sieci Neuronowe Podstawy i Zastosowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994;
- [45] Larose D.: Data Mining Methods and Models. Wiley-Interscience, Hoboken NJ 2006;
- [46] Maimon, O., Rokach, L (2005): The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. Springer;

- [47] Marsel A.: 25 lat kolei dużych prędkości we Francji, Technika Transportu Szynowego 10/2006;
- [48] Moubray J.. Reliability-centred Maintenance. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991;
- [49] Moubray J.: Reliability-centered Maintenance. Butterworth-Heinemann, ISBN 0 7506 3358 1, 1999 Life Cycle Cost Issues in Rolling Stock Asset Management, Rail Maintenance and Asset Management Conference, 2003;
- [50] NetTrac 6619 RIES: Diagnostic System for Electronic Interlockings solution, Thales;
- [51] Niziński S.: Elementy eksploatacji obiektów technicznych, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2000;
- [52] Norma PN-EN 50126:2002-1+PN-EN 50126:2002/AC:2006 Zastosowania kolejowe. Specyfikowanie i wykazywanie Nieuszkodzalności, Gotowości, Obsługiwalności i Bezpieczeństwa (RAMS)- Część 1: Wymagania podstawowe i procesy ogólnego przeznaczenia (oryg.);
- [53] Norma PN-EN 50129:2007 Zastosowania kolejowe. Systemy łączności, przetwarzania danych i sterowania ruchem. Elektroniczne systemy sterowania ruchem związane z bezpieczeństwem Norma EN 50129;
- [54] Obuchowicz A., Korbicz J.: Algorytmy ewolucyjne w systemach diagnostycznych. Mat. V Konferencji „Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Łagów 2001;
- [55] Okręgliński W., Łopuszański B.: Użytkowanie urządzeń mechanicznych. WNT, Warszawa 1980;
- [56] Opis Techniczny napędu EBI Switch 2000, Bombardier;
- [57] Optram - Railway Maintenance Decision Support System, Bentley;
- [58] Oyebande, B. O., & Renfrew, A. C. (2002). Condition monitoring of railway electric point machines. IEE Proceedings—Electric Power Applications, 149(6), 465–473;
- [59] Pełka A., Uhl T.: Zintegrowany system monitoringu infrastruktury kolejowej, Olsztyn, 2008;
- [60] Pietrzyk A., Uhl T.: Optymalizacja eksploatacji maszyn i urządzeń, Diagnostyka nr 26, 2002;

- [61] Pietrzyk A.: Optymalizacja serwisowania urządzeń technicznych z zastosowaniem algorytmów genetycznych, Praca doktorska, Kraków 2004;
- [62] Prezentacja dotycząca napędu zwrotnicowego L826H, Thales;
- [63] Raport o stanie rynku kolejowego w Polsce, Forum Kolejowe Railway Business Forum (RBF), Warszawa 2006;
- [64] Roberts, C., Dassanayake, H. P. B., Lehrasab, N., & Goodman, C. J. (2002). Distributed quantitative and qualitative fault diagnosis: Railway junction case study. *Control Engineering Practice*, 10, 419–429;
- [65] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury Dz. U. Nr.175;
- [66] Rusak dużych.: Pociągi dużych prędkości w Niemczech, *Technika Transportu Szynowego* 10/2007;
- [67] Rusak R.: 15 lat hiszpańskich kolei dużych prędkości, *Technika Transportu Szynowego* 5-6/2006;
- [68] Smith D.J.: *Reliability, Maintainability and Risk*. Butterworth-Heinemann, ISBN 0 7506 5168 7, 2001;
- [69] SURVAIG® NG Remote condition monitoring and predictive maintenance of points and crossings, Vossloh;
- [70] Svee H., Hans Jørgen Sæbø, Jørn Vatn: Estimating the potential benefit of introducing reliability centred maintenance on railway infrastructure, *Safety and Reliability*, Balkema, Rotterdam 1998;
- [71] Świadectwo dopuszczenia do stosowania dla napędu EEA-5, U/2007/0154;
- [72] Tadeusiewicz R. i in.: *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000 - Tom 6 - Sieci neuronowe*; (Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT/2000);
- [73] Tadeusiewicz R.: *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998;
- [74] Tadeusiewicz R.: *Sieci Neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993;
- [75] TM100 Tie-Integrated Switch Machine, Operation, Installation, and Maintenance Manual P2497, ALSTOM Signaling Inc., 2005;

- [76] Uhl T., Kurkowski A., Pawlak J., Pełka A., Pietrzyk A., Hanc A.: A new SHM system for railway infrastructure, 4th European Workshop on Struktura Health Monitoring, Kraków 2008;
- [77] Uhl T., Giergiel J.: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN, Warszawa 1990;
- [78] Uhl T., Pietrzyk A., Piskorz Z.: Wykorzystanie technik RCM w projektowaniu systemów monitorowania, Instytut Technologii Eksploatacji „Problemy Eksploatacji” 4, str. 273-279, 2001;
- [79] Uhl T., Pietrzyk A.: Optymalizacja serwisowania pojazdów szynowych z zastosowaniem techniki RCM, Konferencja Transport XXI w., Warszawa 20-22 Wrzesień 2004;
- [80] Uhl T.: Identyfikacja układów mechanicznych. ZN AGH, Nr 25, Kraków 1990;
- [81] VICOS S&D, The Efficient Information System for Service and Diagnosis in Automated Railway Systems, Siemens;
- [82] Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Technicznego Rozjazdów Rz 60E1-300-1:9 z krzyżownicą ze stałym dziobem, Koltram;
- [83] Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Technicznego Rozjazdów Rz 60E1-500-1:12 sb z krzyżownicą z ruchomym dziobem, Koltram;
- [84] Wkładka katalogowa dla napędu EBI Switch 2000, Bombardier;
- [85] Wkładka katalogowa dla napędu S700KM, Siemens;
- [86] Woropay M.: Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn. ATR, Bydgoszcz 1994;
- [87] www.euromain.org;
- [88] Wytyczne odbioru technicznego i przekazywania do eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym w przedsiębiorstwie PKP, WOT-E12;
- [89] Wytyczne techniczne budowy urządzeń sterowania ruchem kolejowym w przedsiębiorstwie Polskie Koleje Państwowe, WTB-E10;
- [90] Zadanie 2, Projekt celowy nr 6 ZR9 2005 C/06688, Badania nad opracowaniem i udoskonaleniem metodyki algorytmów eksperckich;
- [91] Zadanie 3, Projekt celowy nr 6 ZR9 2005 C/06688, Opracowanie modeli relacji diagnostycznych dla procedur diagnozowania stanu napędów zwrotnicowych;

- [92] Zadanie 4, Projekt celowy nr 6 ZR9 2005 C/06688, Badania nad opracowaniem metodyki i algorytmów monitorowania napędów zwrotnicowych;
- [93] Zadanie 9, Projekt celowy nr 6 ZR9 2005 C/06688, Badania nad opracowaniem i udoskonaleniem metodyki algorytmów eksperckich;
- [94] Zattoni E. : Detection of incipient failures by using an H2-norm criterion: Application to railway switching points, Control Engineering Practice 14 (2006) 885–895;
- [95] Zhou, F. B., Duta, M. D., Henry, M. P., Baker, S., & Burton, C. (2002). Remote condition monitoring for railway point machine. In Proceedings of the 2002 ASME/IEEE joint rail conference (pp. 103–108). Washington, DC;
- [96] Żółtowski B., Cempel C.: Inżynieria Diagnostyki Technicznej, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004;
- [97] Żółtowski B.: Identyfikacja diagnostyczna obiektów technicznych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Z. 1 (105), PAN, 1996;
- [98] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Wyd. ATR, Bydgoszcz 1996;

10. Spis ilustracji:

Rys. 1. Schemat blokowy komputerowego systemu sterowania ruchem kolejowym.....	8
Rys. 2. System zarządzania infrastrukturą oparty na modułach VICOS.....	15
Rys. 3. Metody organoleptyczne i przyrządowe w diagnostyce maszyn [96].....	17
Rys. 4. Napęd zwrotnicowy EEA-5 zabudowany w rozjeździe.....	25
Rys. 5. Zabudowa napędu zwrotnicowego z boku toru [15]	26
Rys. 6. Zintegrowany napęd zwrotnicowy EBI Switch 2000 zabudowany w rozjeździe [84].	27
Rys. 7. Zintegrowany napęd zwrotnicowy TM 100 zabudowany w rozjeździe [75]	27
Rys. 8. Budowa napędu zwrotnicowego typu EEA-4 [14].....	30
Rys. 9. Hamulec zaporowy napędu EEA-4 [14].	32
Rys. 10. Budowa napędu zwrotnicowego typu EEA-5 [16].....	34
Rys. 11. Sprzęgło siły trzymani napędu EEA-5.....	36
Rys. 12. Moduł zamykający napędu EEA-5.	36
Rys. 13. Fazy przestawiania napędu EEA-5.	38
Rys. 14. Położenie styków modułu sterująco-kontrolny w fazach przestawiania	39
Rys. 15. Położenie blokad w rowkach suwaków kontrolnych napędu.....	40
Rys. 16. Napęd zwrotnicowy S700K.....	42
Rys. 18. Ekran programu do przeprogramowania parametrów napędu EBI Switch 2000 [56].	46
Rys. 20. Napęd EBI Switch 700 - Widok napędu od góry ze zdjętą pokrywą [12].....	50
Rys. 21. Napęd zwrotnicowy typu S700KM [85]	51
Rys. 22. Napęd zwrotnicowy typu L826H [62]	52
Rys. 23. Budowa rozjazdu kolejowego	53
Rys. 24. Plan rozjazdu zwyczajnego R300 skos 1:9 [11]......	54
Rys. 25. Napęd zwrotnicowy zabudowany przy rozjeździe.	55
Rys. 26. Plan zabudowy napędu zwrotnicowego do zwrotnicy.....	55
Rys. 27. Wykres pracy zamknięcia zwrotnicy	56
Rys. 28. Schemat działania suwakowego zamknięcia nastawczego.	57
Rys. 29. Proces analiz RCM [61]	60
Rys. 30. Diagram przypadków użycia dla napędów zwrotnicowych.....	63
Rys. 31. Diagram sekwencji dla systemu eksploatacji napędu	63
Rys. 32. Diagram sekwencji działania napędu EEA-5	64
Rys. 33. Diagram komponentów systemu eksploatacji	64
Rys. 34. Ekrany interfejsu administratora.....	68
Rys. 35. Ekrany interfejsu operatora	69
Rys. 36. Ekrany interfejsu operatora	70
Rys. 37. Rodzaje rozjazdów	71
Rys. 38. Rodzaje zamknięcia w zwrotnicy	72
Rys. 39. Źródła usterek dla rozjazdów z napędami EEA-4	73
Rys. 40. Przyczyny awaryjności napędu EEA-4 wg elementów napędu	73
Rys. 41. Wpływ pory roku.....	74
Rys. 42. Źródła usterek dla rozjazdów z napędami EEA-5	75
Rys. 43. Przyczyny awaryjności napędu EEA-5 wg elementów napędu	76
Rys. 44. Zużycia elementów hamulca zatrzymowego napędu EEA-4.....	77
Rys. 45. Fragment ułamanej płyty osłony silnika	78
Rys. 46. Model wielobryłowy zwrotnicy z napędem zwrotnicowym.	81

Rys. 47. Wykres siły oporów przestawiania mierzony na suwaku nastawczym napędu w trakcie przestawiania zwrotnicy (wynik symulacji).	83
Rys. 48. Wyodrębnione fazy przestawiania układu napęd-rozjazd.....	84
Rys. 50. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant I dla przypadków 4, 5 i 6.....	87
Rys. 51. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant II.....	88
Rys. 52. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant II.....	88
Rys. 53. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant III.....	89
Rys. 54. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant III.....	89
Rys. 55. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant IV.....	90
Rys. 56. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant IV.....	90
Rys. 57. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant V.....	91
Rys. 58. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant V.....	91
Rys. 59. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant VI.....	92
Rys. 60. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant VI.....	92
Rys. 61. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant VII.....	93
Rys. 62. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant VII.....	93
Rys. 63. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant VIII.....	94
Rys. 64. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant VIII.....	94
Rys. 65. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant IX.....	95
Rys. 66. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant IX.....	95
Rys. 67. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant X.....	96
Rys. 68. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant X.....	96
Rys. 69. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant XI.....	97
Rys. 70. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant XI.....	97
Rys. 71. Zmiana wartości momentu napędowego w czasie przestawiania zwrotnicy – wariant XII.....	98
Rys. 72. Zmiana siły w połączeniu drążka z napędem – wariant XII.....	98
Rys. 73. Schemat blokowy modułu pomiarowego EKD-1.....	101
Rys. 74. Moduł EKD-1 pracujący w układzie Arona.....	102
Rys. 75. Moduł EKD-1 przedstawiony jako amperomierze i woltomierze.....	102
Rys. 76. Przebieg napięcia z czujnika tensometrycznego.....	104
Rys. 77. Przebieg momentu obciążenia z modułu pomiarowego EKD-1.....	105
Rys. 78. Przebieg siły na suwaku napędu zwrotnicowego.....	105
Rys. 79. Wykres zbiorczy serii pomiarów.....	106
Rys. 80. Porównanie wykresów – LMS $y=ax+b$	108
Rys. 81. Błąd średniokwadratowy – LMS $y=ax+b$	108
Rys. 82. Względny błąd średniokwadratowy – LMS $y=ax+b$	109
Rys. 83. Względny błąd średniokwadratowy – LMS $y=ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$	109
Rys. 84. Porównanie obu metod pomiarowych po przeskalowaniu funkcją liniową.....	110

Rys. 85. Porównanie pomiarów przy różnych temperaturach otoczenia.....	111
Rys. 86. Podłączenie modułu pomiarowego w nastawni stacji Kobiór.....	113
Rys. 87. Badany napęd nr 1 na stacji Kobiór.....	114
Rys. 88. Przebieg siły oporów przestawiania dla napędu nr 1 zarejestrowany modułem EKD-1	115
Rys. 89. Przebieg siły oporów napędu nr 1 zarejestrowany czujnikiem tensometrycznym....	115
Rys. 90. Przebieg siły oporów przestawiania dla napędu nr 2 zarejestrowany modułem EKD-1	116
Rys. 91. Przebieg siły oporów napędu nr 2 zarejestrowany czujnikiem tensometrycznym....	116
Rys. 92. Porównanie przebiegów siły oporów dla napędu nr 1.	118
Rys. 93. Porównanie przebiegów siły oporów dla napędu nr 2.	118
Rys. 94. Podłączenie modułu EKD-1 do napędu zwrotnicowego	120
Rys. 95. Idea układu pomiarowego napędów zwrotnicowych.....	121
Rys. 96. Idea gromadzenia danych diagnostycznych z napędów zwrotnicowych.....	121
Rys. 97. Wykres siły nastawczej wyznaczony za pomocą symulacji z podziałem na fazy....	124
Rys. 98. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie II.	124
Rys. 99. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie III.....	125
Rys. 100. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie IV.....	125
Rys. 101. Wykres siły nastawczej i aproksymacji wielomianowej w fazie V.....	126
Rys. 102. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy II.....	130
Rys. 103. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy III.....	130
Rys. 104. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy IV	131
Rys. 105. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla fazy V.....	131
Rys. 106. Wyniki grupowania dla wektora wejściowego dla wszystkich współczynników.	132
Rys. 107. Wyniki grupowania metodą k-średnich.....	136
Rys. 108. Przykład sieci neuronowej z węzłami rozmieszczonymi na płaszczyźnie.....	138
Rys. 109. Region dla grupy uszkodzeń C1, C4 i C13.	139
Rys. 110. Region dla grupy uszkodzeń C2 i C3.....	140
Rys. 111. Region dla grupy uszkodzeń C5, C7, C11 i C12.....	140
Rys. 112. Region dla grupy uszkodzeń C6 i C8.....	141
Rys. 113. Region dla uszkodzenia C14.	142