

Radosław Miklasz

System diagnostyczny układu napędowego pojazdów szynowych

W artykule omówiony został system diagnostyczny układu napędowego pojazdów szynowych ze szczególnym uwzględnieniem podatności diagnostycznej układu. Podano również wytyczne do opracowania modeli systemu diagnostycznego. Artykuł powstał w ramach projektów celowych: Prognozowanie stanu technicznego głównych systemów pojazdu szynowego na podstawie analizy zmian wartości charakterystycznych parametrów podzespołów (N N509 336637) i Mikroprocesorowy system diagnostyczny głównych systemów trakcyjnego pojazdu szynowego uwzględniający ocenę bieżącą i prognozowanie stanów (N R10 0048 06/2009), finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Wstęp

Nowoczesne pojazdy szynowe, przystosowane do zwiększonych wymagań eksploatacyjnych, wymagają ścisłego nadzoru ich pracy w całym okresie użytkowania. Pojawiające się uszkodzenia, a właściwie symptomy tych uszkodzeń, powinny być na bieżąco monitorowane, a po przekroczeniu pewnych zadanych warunków progowych poddane obsłudze eksploatacyjnej (regulacji, naprawie, wymianie).

Warunkiem właściwego określenia stanu pracy pojazdu jest znajomość stanów pracy jego poszczególnych układów oraz dogłębna znajomość możliwych uszkodzeń i ich wpływu na późniejsze stany pracy całego pojazdu. Systemy diagnostyczne powinny zatem opierać się na szerokiej wiedzy, często czerpanej z różnych dziedzin nauki.

W przedstawionym artykule podjęto próbę opisanie systemu diagnostycznego bazującego na układach napędowych pojazdów szynowych.

1. Podstawowe pojęcia określające system diagnostyczny

1.1. System architektury pojazdu

Pojazdy trakcyjne szynowe obejmują lokomotywy elektryczne i spalinowe oraz elektryczne zespoły trakcyjne (EZT). Jako wybrany system architektury pojazdu można przyjąć system napędu elektrycznego, w którym układ napędowy przenosi moment obrotowy z elektrycznego silnika trakcyjnego na koła pojazdu trakcyjnego.

1.2. Specyfikacja strukturalna

Struktura pojazdu i charakteryzujące ją parametry określają stan techniczny pojazdu. Wzajemny związek parametrów struktury i parametrów stanów wyjściowych pozwala w określonych warunkach traktować je jako symptomy stanu technicznego obiektu, mierzone bez jego demontażu. Gdy podstawowe parametry struktury nie zmniejszą wartości granicznej, pojazd spełnia swe podstawowe funkcje i uważa się, że jest on w stanie zdatności.

1.3. Specyfikacja funkcjonalna

Obiekt prognozowania rozdziela się na funkcjonalne zespoły, podzespoły i elementy; bada się także charakter zmian ich stanu technicznego – pogorszenie stanu zdatności. Diagnostyka funkcjonalna zajmuje się oceną stanu technicznego badanego obiektu poprzez wykorzystanie do pomiarów sygnałów powstających podczas pracy badanego obiektu.

1.4. Stan techniczny pojazdu

Klasyfikacja parametrów diagnostycznych pozwala na formalne zdefiniowanie kilku klas stanów technicznych ze względu na kryteria użytkowe [12]:

- a) kryterium bezpieczeństwa:
 - zdatności,
 - zdatności warunkowej,
 - niezdatności;
- b) kryterium funkcji użytkowych:
 - zdatności,
 - niepełnej zdatności,
 - niezdatności;
- c) kryterium funkcji pomocniczych:
 - zdatności,
 - niecałkowitej zdatności.

1.5. Prognozowanie stanów

Prognozowanie stanu technicznego pojazdu jest to przewidywanie przyszłego czasu niezawodnego użytkowania, tj. prognozowanie stanu zdatności z wykorzystaniem określonych danych, np. obliczeń, pomiarów i ocen.

2. Układy napędowe trakcyjnych pojazdów szynowych

Układy napędowe w artykule ograniczono do wózka pojazdu i zagadnień związanych z przeniesieniem napędu z silników trakcyjnych na koła zestawów, co potocznie określamy jako mechanizm (układ) napędowy.

Układ napędowy na wózku obejmuje:

- elektryczny silnik trakcyjny,
- zawieszenie silnika na ramie wózka,
- zawieszenie silnika na osi zestawu kołowego,
- przekładnię zębatą,
- mechanizmy z członami podatnymi (np. wał drążony, sprzęgła),
- zestawy kołowe,
- maźnice.

Napęd zestawu kołowego może być pojedynczy lub grupowy. W dalszych rozważaniach mowa będzie o indywidualnym napędzie kół pojazdów trakcyjnych, gdyż takie są powszechnie stosowane na polskich liniach kolejowych. Rodzaje układów napędowych indywidualnych opisane są w literaturze [2] i oznaczono je symbolami: IETN, IETUz, IEUsNP, IEUsNS, IEUsUpP, IEUsUpS. W pojazdach trakcyjnych poruszających się po polskich liniach

kolejowych najczęściej stosowane są następujące mechanizmy napędowe: IETN (lok. SP45, SU45, ST45, SU46, ST46, SM42), IEUsUpP (lok. EP09), IEUsUpS (lok. EU07, EP07, EP08, ET22).

3. Podatność diagnostyczna układu napędowego

Diagnostyka przeprowadzana przez system diagnostyczny dotyczyć powinna pojazdu w ruchu. System powinien gromadzić, analizować i przetwarzać szereg danych eksploatacyjnych, zapewniając zebranie zestawu informacji, na podstawie których będzie możliwe zidentyfikowanie powstałych uszkodzeń, nie dopuszczając w ten sposób do powstania grożącej pojazdowi awarii.

Dla pojazdów będących w ruchu można wykorzystywać diagnostyczne symptomy stanu technicznego pojazdu, takie jak stan cieplny i drgania. Na podstawie analizy rozwiązań konstrukcyjnych można ocenić podatność diagnostyczną, czyli możliwość rejestracji objawów (symptomów), które służą jako sygnał diagnostyczny. Ocenie powinny zostać poddane podstawowe zespoły, podzespoły i części układu napędowego, które rzutują na bezpieczeństwo eksploatacji pojazdu szynowego.

3.1. Zestaw kołowy

Pomiary pośrednie parametrów diagnostycznych zestawów kołowych można wykonać poprzez wykorzystanie sygnału diagnostycznego na styku koła z szyną, gdzie następuje generowanie drgań związanych ze stanem technicznym tego układu. Drgania są odbierane przez czujniki pomiarowe zabudowane na łożyskach osi zestawu kołowego lub na korpusie maźnicy. Ocenę poziomu drgań zestawów kołowych wykorzystywać można także do oceny i kontroli warunków jazdy w celu zapobieżenia wykolejeniom (stabilność jazdy). W ten sposób można określić poziomy drgań (przyspieszeń) dla bezpiecznej jazdy pojazdu.

3.2. Łożyskowanie toczne

W układzie napędowym łożyskowanie toczne stosowane jest w:

- maźnicy,
- silniku trakcyjnym (łożyskowanie na wale drążonym, wirniku silnika),
- przekładni (łożyskowanie dużego koła zębatego lokomotywy EP09),
- wale drążonym (lokomotywy EP07, EP08).

Ocenę stanu łożysk można przeprowadzić metodą bezpośrednią poprzez sygnały pomiarowe drgań i temperatur, mierzone na łożysku lub obudowie łożyska.

W zależności od konstrukcji zespołu czujniki pomiarowe można wykorzystać także do oceny innych zespołów, jak np. przekładni zębatej oraz zestawu kołowego.

3.3. Łożyskowanie ślizgowe

Łożyskowanie ślizgowe stosuje się w zawieszeniu silników trakcyjnych na osi zestawu kołowego (np. lokomotyw SU45, ST45, SM42) lub w łożyskowaniu wału drążonego (lokomotywy EU07, ET22). Diagnostykę stanu łożysk można ograniczyć do pomiaru temperatury. Konstrukcja takiego węzła łożyskowego umożliwiła zabudowę czujników dla systemu diagnostycznego.

3.4. Przekładnie trakcyjne

Stan techniczny przekładni w czasie jazdy można sprawdzić pośrednio metodami diagnostyki wibroakustycznej (pomiar drgań). Konstrukcja krajowych przekładni trakcyjnych unie-

możliwia zabudowę czujników na obudowie przekładni, ponieważ stanowi ona najczęściej osłonę wykonaną z blachy.

Do pomiaru drgań należy wykorzystać czujniki zamocowane na obudowie łożysk tocznych silnika trakcyjnego lub na obudowie łożysk przekładni lokomotywy (lok. EP09). Sygnał drganiowy w takim przypadku wymaga rozdzielenia na składowe, z których każda określa stan tylko jednego elementu.

4. System diagnostyczny z uwzględnieniem norm europejskich

Według wymagań Europejskiej Technicznej Specyfikacji dla Interoperacyjności (TSI), ujętych w Dyrektywie 96/48EC, monitoring wózka powinien obejmować:

- stabilność biegu wózka – powinna ona być kontrolowana ciągle lub z częstotliwością zapewniającą niezawodne i wczesne wykrycie uszkodzeń,
- stan łożyskowania zestawów kołowych – system powinien wykryć pogorszenie się stanu łożyskowania, śledząc temperaturę i / lub częstotliwość drgań dynamicznych,
- stan zestawu kołowego za pomocą czujnika drgań zabudowanego na obudowie łożyska osi.

5. Miejsce zabudowy czujników monitorowania stanu wózka

Do rozważań wstępnych dla systemu diagnostycznego przyjęć można najprostszy układ napędowy typu IETN – z zawieszeniem silnika na osi zestawu kołowego na łożyskach ślizgowych.

Czujniki można zamontować w różnych miejscach w celu zdobycia poszczególnych informacji:

- 1) czujnik pomiaru drgań i temperatury zabudowany na korpusie maźnicy lub na łożysku może monitorować:
 - stan łożyskowania zestawu kołowego,
 - uszkodzenia koła (płaskie miejsca, poligonalizacja),
 - niestabilność jazdy (warunki wykolejenia);
- 2) czujnik pomiaru drgań zabudowany na pokrywie łożyskowej silnika trakcyjnego od strony przekładni może monitorować:
 - stan łożyska,
 - stan przekładni zębatej;
- 3) czujnik pomiaru drgań zabudowany na pokrywie łożyskowej silnika trakcyjnego od strony przeciwnej do przekładni pozwala na monitorowanie stanu łożyska;
- 4) czujnik temperatury umieszczony na obudowie łożyska ślizgowego zawieszenia silnika może monitorować stan łożysk ślizgowych poprzez pomiar temperatury.

6. Kryteria obiektywnej oceny sprawności

Ocenić sprawności podlegają zespoły, podzespoły i układy, które będą monitorowane przez system diagnostyczny. Stan techniczny określają parametry struktury, które w czasie pracy badanego obiektu emitują sygnały pomiarowe (umożliwiają ocenę stanu technicznego obiektu) i odbierane są przez czujniki pomiarowe.

W określeniu kryteriów obiektywnej oceny należy wyszczególnić rzeczywiste stany obiektu diagnostycznego poprzez określenie:

- parametrów struktury (np. zmiana kształtu koła, płaskie miejsca, wzrost temperatury i poziomu drgań),
- kryteriów oceny (rozumianej jako stan zdalny i stan niezdatny),
- symptomów (pomiar bezpośredni, pomiar drgań),
- sygnału pomiarowego (np. pomiar na korpusie maźnicy, łożyskowaniu osi zestawu kołowego, łożyskowaniu silnika).

Dane te należy traktować jako wytyczne, gdyż szczegółową analizę należy przeprowadzić dla konkretnego układu napędowego pojazdu trakcyjnego na podstawie analizy rozwiązań konstrukcyjnych.

Kryteria obiektywnej oceny sprawności wpisane są w rewers eksploatacyjny pojazdu. Resurs oznacza ustalony doświadczeniowo i teoretycznie okres pracy sprzętu, w czasie którego zagwarantowane są bezpieczeństwo urządzenia oraz jego sprawność eksploatacyjna. Strategia eksploatacyjna pojazdów szynowych według resursu określa system technicznego utrzymania elektrycznych i spalinowych pojazdów trakcyjnych, tj. ramowy zakres pracy i strukturę cyklu przeglądów i napraw. Określa je instrukcja użytkownika – dla PKP jest to instrukcja Mt-32.

Pojazdy szynowe stosujące strategię eksploatacyjną według resursu są dodatkowo wyposażone w systemy diagnostyczne wspierające racjonalne działania eksploatacyjne, prowadzące kontrolę poprzez monitorowanie zmian wybranych sygnałów diagnostycznych, których wartości wpływają lub mogą wpływać na zmiany terminów i zakres obsługi i napraw.

7. Prognozowanie stanów

Pojazdy szynowe, ich zespoły i podzespoły należą do obiektów technicznie złożonych o różnorodnej strukturze i w zależności od specyfiki wymagają odpowiedniej metody prognozowania ich stanu technicznego. Musi to być poprzedzone skuteczną diagnostyką opartą na dobrej znajomości uszkodzeń i sposobów ich rozróżniania.

Prognozowanie wymaga znajomości związków między parametrami stanu i eksploatacyjną miarą starzenia. Oprócz tego niezbędne jest uprzednie ustalenie wartości granicznych tych parametrów dla stanu zdatności. W tym rozumieniu używa się także określenia 'diagnostyka eksploatacyjna'. Zadaniem diagnostyki eksploatacyjnej jest określenie bieżącego stanu technicznego urządzeń oraz predykcja horyzontu czasowego poprawnego ich działania. Metoda prognozowania określa sposób przetwarzania danych o przeszłości oraz sposób przejścia od tych danych do prognozy.

Stosowane metody prognozowania rozciągają się tu od równania wykładniczego Browna aż do sieci neuronowych z automatycznym nadzorem poprawności modelu. Praktyczne stosowanie metod prognozowania w pojazdach szynowych wymaga ich adaptacji do badanego obiektu oraz uwzględnienia specyfiki obiektu i efektywności jego wykorzystania. Można stosować metody wspólne (kombinowane), np. metodę statystycznej klasyfikacji i analitycznego przeprowadzania prognozy.

Na proces prognozowania mają wpływ czynniki rzutujące na pogorszenie stanu technicznego układu:

- składowe stałe (zdeterminowane),
- składowe stochastyczne.

Różnorodne obiekty (pojazdy szynowe, ich zespoły i podzespoły) wymagają, w zależności od swojej specyfiki, odpowiedniej metody prognozowania ich stanu technicznego. Dla każdego konkretnego przypadku prognozowania stanu zdatności obiektu należy uwzględnić jego charakterystyczne właściwości.

Wybór optymalnej metody prognozowania musi być poprzedzony analizą niezdatności w zakresie:

- określenia stanu zdatności,
- stanu uszkodzeń,
- możliwości prognozy danego uszkodzenia.

8. Wytyczne do opracowania modelu systemu diagnostycznego

8.1. Podstawowe pojęcia [15]

Modelowanie stanowi pierwszy etap formalnego ujęcia zagadnień związanych zarówno z analizą działania, jak i syntezą obiektów diagnozowania. Pozwala ono z określonym przybliżeniem odtworzyć zasady organizacji i funkcjonowania obiektu, co dalej umożliwi uzyskanie informacji o samym modelowanym obiekcie.

Modele diagnostyczne obiektów tworzy się dla potrzeb wnioskowania diagnostycznego w badaniach symulacyjnych lub eksperymentalnych. Model diagnostyczny obiektu jest to więc narzędzie pozwalające opisać obiekt i jego zachowanie się w różnych warunkach za pomocą relacji diagnostycznej na zbiorze cech stanu i zbiorze symptomów. Model obiektu jest to zatem ograniczony zbiór właściwości obiektu, wybranych decyzyjnie ze względu na cel badania.

W diagnostyce technicznej można wyróżnić następujące cele tworzenia modeli:

- dla potrzeb projektowania, gdzie model służy do optymalizacji struktury i parametrów konstruowanego obiektu i jest narzędziem do oceny „jakości” konstrukcji, eliminacji słabych ogniw, projektowania układów nadzoru (modele funkcjonalne i niezawodnościowe),
- dla potrzeb diagnozowania, gdzie model jest podstawą ustalenia algorytmu diagnozowania, który prowadzi do określenia stanu aktualnego i przyszłego obiektu (diagnoza),
- dla potrzeb użytkowania i sterowania, wykorzystującego model podejmowania decyzji z działającym obiektem (zakres działań obsługowych, decyzje eksploatacyjne).

W diagnostyce technicznej pojazdu szynowego wykorzystywać można dwa podstawowe modele diagnostyczne:

- 1) model oparty na klasycznym modelu matematycznym (model strukturalny – diagnozowanie *offline*);
- 2) model wykorzystujący sygnały wibroakustyczne (model SWA – diagnozowanie *online*).

8.2. Obiekty i zakres badań

Obiektem badań diagnostycznych jest jeden z głównych układów pojazdu trakcyjnego (wózka), tj. układ napędowy poszerzony o niektóre elementy układu biegowego pojazdu, wynikające z bezpieczeństwa pojazdu oraz współpracy tor-zestaw kołowy. Trakcyjne pojazdy szynowe obejmują pojazdy różniące się parametrami konstrukcyjnymi, jak np. lokomotywy elektryczne i spalinowe o układzie osi BoBo lub CoCo, elektryczne zespoły trakcyjne, wagony metra, autobusy szynowe itp. Wymaga to wykonania szczegółowych modeli danego pojazdu, uwzględniających zakres badań (zespół, podzespół czy układ).

Uwzględniając wymagania TSI, kart UIC, norm oraz korzystając z wdrożonych układów diagnostycznych czołowych producentów światowych [4, 11, 14], zaproponować można następujące zadania diagnostyki:

- wykrywanie niestabilności jazdy wózka (pojazdu),
- wykrywanie zagrożenia wykolejeniem,
- identyfikacja uszkodzenia koła zestawu kołowego (zmiana kształtu): płaskie miejsca, poligonalizacja,
- badanie łożysk tocznych maźnic,
- określanie stanu toru,
- badanie łożysk tocznych silnika trakcyjnego,
- badanie przekładni.

8.3. Wytyczne do opracowania modeli systemu diagnostycznego

8.3.1. Niestabilność wózka (pojazdu)

Monitoring stanu wózka obejmuje czujniki śledzenia niestabilności biegu, według wymagań TSI, ujętych w Dyrektywie 96/48/WE. TSI ustala, że monitorowanie stabilności biegu musi być realizowane ciągle lub z częstotliwością zapewniającą niezawodne i wczesne wykrycie uszkodzenia. Dla pociągów klasy 1 system musi być także podłączony do pokładowego rejestratora danych diagnostycznych w celu umożliwienia prześledzenia historii danego przypadku. Wg karty UIC 515-1 urządzenie pracujące w oparciu o pomiary przyspieszeń na ramie wózka powinno wykryć niestabilność. Sygnał wykrycia powinien być przekazywany do kabiny maszynisty pojazdu napędzonego pociągu lub bezpośrednio oddziaływać na układ hamowania. Wymagania określone w EN-14363:2005 mogą być stosowane także do monitorowania toru lub pojazdu w eksploatacji.

Model diagnostyczny

Dla wybranego pojazdu należy opracować model oparty na klasycznym modelu matematycznym, w którym pojazd opisany jest układem równań różniczkowych (model strukturalny).

W modelu symulacyjnym strukturalnym należy uwzględnić:

- ❖ model toru,
- ❖ model kontaktu koło - szyna,
- ❖ model dynamiki pojazdu.

Symulacyjny model strukturalny może zostać wykorzystany do diagnozowania stanu układu pojazd - tor w zakresie złożonego uszkodzenia i powinien umożliwić jakościową ocenę monitorowanych zjawisk, tj. monitoring przekroczenia dopuszczalnych poziomów przyspieszenia poprzecznego na ramie wózka. Jest to monitorowanie stanu pojazdu ukierunkowane na wykrycie niestabilności wózków na podstawie porównania sygnału „wzorca” i odpowiadającego mu sygnału z pojazdu niestabilnego.

W literaturze [3] przedstawiono przykładowy model obliczeniowy. Model ten powinien być zweryfikowany poprzez wykorzystanie sygnałów zarejestrowanych w trakcie prowadzonych badań eksperymentalnych.

8.3.2. Wykolejenie

Obowiązujące przepisy TSI nie wymagają monitorowania stanu oddziaływania układu zestaw kołowy - tor, jednakże ze względu na bezpieczeństwo pojazdu bardzo ważne jest wczesne wykrycie pojazdów zagrożonych wykolejeniem. Nowoczesne systemy monitorowania wózków [4, 14, 15] obejmują zagrożenie wykolejeniem. Ocenę i wartości graniczne bezpieczeństwa określa EN-14363:2005 poprzez stosunek siły poprzecznej Y (siły prowadzącej na kole zestawu) do pionowej Q (siły pionowego nacisku na kole zestawu), czyli:

$$\left(\frac{Y}{Q}\right)_{\lim} \leq 1,2 \text{ dla kąta zarysu zew. } 70^\circ \text{ (odpowiada to } \mu=0,36) \quad (1)$$

Wartości te możemy jedynie sprawdzić w warunkach badawczych. Natomiast w diagnostyce wykorzystuje się zasadę, że istotnym elementem bezpiecznej jazdy pojazdów szynowych jest poziom drgań zestawów kołowych.

Model diagnostyczny

Producenci układów diagnostycznych nie publikują informacji na temat opracowanych modeli diagnostycznych. W literatu-

rze [4] przedstawiono nową metodę oceny bezpiecznej jazdy pojazdu szynowego za pomocą współczynnika λ , charakteryzującego poziom przyspieszeń zestawu kołowego i otrzymanego w wyniku dyskretnej transformacji Karhunen-Loewe. Transformacja ta jest w pewnym sensie podobna do transformacji Fouriera, jednak wykorzystuje funkcje charakterystyczne zależne od sygnału. W doświadczalnych i symulacyjnych badaniach niemieckich z wykorzystaniem specjalnego stanowiska za graniczną wartość współczynnika λ , wyrażającego poziom energii zakłóceń podczas jazdy, uznano zakres $25 \div 40 \text{ m}^2/\text{s}^4$. Można przyjąć, że metoda ta została poddana wstępnej weryfikacji doświadczalnej łącznie z pomiarem przyspieszeń z wynikiem pozytywnym. Dla wybranego pojazdu szynowego należy opracować strukturalny model diagnostyczny oparty na modelu matematycznym w zakresie współpracy koła z szyną, z rejestracją sygnałów pomiarowych na maźnicy.

8.3.3. Płaskie miejsca

Przepisy TSI nie wymagają monitorowania stanu zestawu kołowego ze względu na uszkodzenie kół określone jako płaskie miejsce. Uszkodzenie to powstaje w trakcie eksploatacji zestawu kołowego, np. podczas jazdy z zablokowanym hamulcem czy po przypadkowym najechnaniu na przedmiot znajdujący się na torze. Powstałe płaskie miejsce narasta w trakcie dalszego użytkowania zestawu i wymaga odnowy profilu. Płaskie miejsce jest przyczyną innych uszkodzeń, jak np. przyspieszonego zużycia szyn, uszkodzenia elementów konstrukcyjnych wózka.

Obsługa zestawu kołowego jest kosztowna i czasochłonna. Poprzez monitorowanie zestawu można realizować obsługę wg stanu technicznego wózka, a częstotliwość operacji naprawczych można zaplanować przy optymalizacji przebiegu eksploatacji zestawów kołowych bez uszczerbku dla niezawodności i bezpieczeństwa.

W najnowszych systemach diagnostycznych [11, 14] ujęto monitorowanie płaskich miejsc. Wskazane jest, aby w proponowanym systemie możliwe było wykrycie uszkodzenia w eksploatacji i sygnalizowanie przekroczenia wartości dopuszczalnych parametrów diagnostycznych.

Model diagnostyczny

Model powinien uwzględniać kinematykę i dynamikę zestawu kołowego z płaskim miejscem. Model strukturalny ograniczony powinien być do współpracy koło - szyna przy założeniu, że pojazd porusza się po sztywnym torze; powinien uwzględniać też:

- parametry płaskiego miejsca,
- promień koła zestawu,
- prędkość pojazdu,
- ciężar całkowity przypadający na jedno koło.

W analizie należy uwzględnić czynniki wiążące się z wykrywaniem, identyfikacją i pomiarem uszkodzeń [6]. W związku z tym należy wyznaczyć:

- prędkość krytyczną,
- czas utraty kontaktu między kołem a szyną,
- zmianę pędu przy uderzeniu.

8.3.4. Poligonalizacja (zmiana kształtu koła)

Przepisy TSI nie wymagają monitorowania uszkodzenia powierzchni tocznej, czyli poligonalizacji. Uszkodzenie to powstaje w ramach normalnej eksploatacji i intensywność rozwoju tego zjawiska zależy od wielu czynników. Na styku koła z szyną powstają wówczas drgania przenoszące się na dalsze objekty. Powstające wady powodują hałas w pojeździe,

niszczenie toru, rozluźnienie mocowania szyn, przeciążenie i uszkodzenie elementów wózka. Dlatego też ważne zdaje się monitorowanie tego zjawiska. Nowoczesne systemy monitorowania [11] wykrywają to uszkodzenie, ponieważ jest ono uciążliwe dla eksploatacji i otoczenia, a także utrudnia obsługę zestawu kołowego.

Model diagnostyczny

Producenci układów diagnostycznych nie publikują informacji na temat opracowanych modeli diagnostycznych. W tym przypadku pomocne mogą być badania przeprowadzone w Metrze Warszawskim [9, 10] oraz opisane w literaturze [6].

Z badań [9] wynikają następujące wnioski:

- ❖ zjawisko poligonalizacji może przybierać postać zmian harmonicznym o porównywalnej amplitudzie sąsiednich pików, jak też może występować jako dominujący impuls jednostkowy na tle znacznie mniejszych zmian harmonicznym,
- ❖ odległość między sąsiednimi pikami poligonalizacji nie jest wartością stałą,
- ❖ nie zanotowano zależności między wielkością poligonalizacji a długością fali,
- ❖ zmiana w czasie wykresu poligonalizacji obejmuje przyrost amplitudy, tworzenie nowych lub zanik starych pików oraz zmianę odległości między pikami.

Nie zanotowano regularności wynikającej z istoty poligonalizacji. Powyższe wnioski potwierdzają także inne wyniki badań [6].

Można zatem stwierdzić, że dla poligonalizacji kół nie ma możliwości opracowania modelu matematycznego. W tym przypadku należy zbudować model wykorzystujący sygnały wibroakustyczne, co wymaga pomiarów stanowiskowych wielkości poligonalizacji i badań eksploatacyjnych określających zależność powstających drgań na styku koło - szyna od wielkości bicia promieniowego.

8.3.5. Łożyskowanie toczne maźnic

Wymagania TSI stanowią, że za pomocą sprzętu pomiarowego należy wykryć stan niezdatności łożysk maźniczych poprzez monitorowanie temperatury lub poziomu drgań. Obecnie na polskich liniach kolejowych stosowany jest system monitorowania maźnic za pomocą stacjonarnych przytorowych czujników. Proces detekcji wykorzystuje zjawisko radiacji termicznej uszkodzonych łożysk (czujniki promieniowania podczerwonego), co umożliwi wykrycie stanów awaryjnych.

Model diagnostyczny

Można przyjąć w tym przypadku model wykorzystujący sygnały wibroakustyczne (model SWA – diagnozowanie *online*). Do diagnozowania łożysk można wykorzystać istniejącą metodę wykorzystywaną w dotychczas prowadzonych pracach badawczych [1, 13]. Najbardziej przydatna jest metoda detekcji obwiedni lub metoda MPM (*Multi-Parametr-Monitoring*) opracowana przez SKF. Ogólnie metoda MPM, w odniesieniu do sygnałów wibroakustycznych, polega na uzupełnieniu konwencjonalnej metody analizy drgań o technikę analizy obwiedni, analizę spektralną emitowanej energii (SEE – *Spektral Emitted Energy*) oraz o inne mierzone parametry (prędkość, temperatura łożyska i czynnik smarujący, zanieczyszczenia smaru). Inna metoda – SPM (*Shock Puls Method*) – wymaga najczęściej specjalnego przygotowania układu do zabudowy czujnika.

8.3.6. Stan toru

W zakresie stanu toru będą uwzględnione tylko wybrane parametry nierówności toru, jak np. faliste zużycie szyn (korugacja) i fale poślizgowe na torach z łukami. Nierówności toru powodują wymuszenia kinematyczne drgań pojazdów szynowych. Wymuszenia te wpływają na bezpieczeństwo, komfort jazdy, a także na trwałość i zużycie zarówno pojazdu, jak i toru. Następuje wtedy wzrost sił kontaktowych na styku koło - szyna. Te szkodliwe nierówności toru są usuwane poprzez szlifowanie szyn.

Model diagnostyczny

Model powinien być oparty na klasycznym modelu matematycznym, gdzie obciążenia dynamiczne zespołów układów jezdnych wyznaczone będą za pomocą ich modeli matematycznych z wyznaczeniem kinematycznym, w postaci funkcji opisujących charakterystyki profilu nierówności (długość fali, głębokość zużycia). Parametry diagnostyczne należy ustalić w wyniku symulacji komputerowej dla konkretnego pojazdu. Model można wykonać w sposób uproszczony dla układu zestaw kołowy - tor lub też w ramach modelu obliczeniowego całego pojazdu.

8.3.7. Łożyskowanie toczne silnika trakcyjnego

Diagnostykę eksploatacyjną silników trakcyjnych ograniczyć można do łożysk tocznych silników trakcyjnych, które stanowią podłoże mechaniczne do drgań maszyn elektrycznych. Ułożyskowanie jest jednym z najważniejszych elementów silników elektrycznych, diagnostyka ich stanu technicznego ma zasadnicze znaczenie w praktyce eksploatacyjnej.

Model diagnostyczny

Model diagnostyczny należy wykonać w oparciu o wytyczne zawarte w p. 8.3.5. Ocenę węzła łożyskowego przeprowadzić można z uwzględnieniem diagnostyki przekładni trakcyjnej.

8.3.8. Przekładnia trakcyjna

Ze względu na skutki awarii i koszty napraw przekładni trakcyjnej diagnozowanie przekładni (poprzez system ciągłego monitorowania i analizy sygnałów drganiowych) powinno być możliwe w nowych i zmodernizowanych pojazdach trakcyjnych [11]. Podstawowym elementem przekładni są koła zębate i łożyska. Wymagają one różnego sposobu diagnozowania i dlatego te zagadnienia powinny być omówione oddzielnie. Dla przekładni trakcyjnej nie ma kompleksowego systemu diagnozowania w warunkach eksploatacji.

Model diagnostyczny

Dane do diagnostyki przekładni to:

- 1) schemat kinematyczny,
- 2) liczba zębów kół,
- 3) typ ułożyskowania przekładni,
- 4) prędkość obrotowa wejściowa lub wyjściowa przekładni.

Problemy diagnostyki przekładni zębatych można przedstawić na najprostszym modelu przekładni jednostopniowej sztywno ułożyskowanej o zębach prostych.

W literaturze [5], w której przedstawiono przykładowy model dynamiczny przekładni jednostopniowej, proponuje się wprowadzić skończoną podatność łożysk, gdyż nie wpływa to w sposób istotny na zjawiska dynamiczne i w związku z tym łożysko można badać oddzielnie. Ruch obrotowy sprowadzono tam do ruchu posuwistego odpowiednio dobranego modelu.

Bryła o masie M dociskana jest siłą P do sprężyn, które przemieszczają się z określoną prędkością w kierunku poziomym, tj. prostopadłym do kierunku działania siły i ewentualnych drgań.

W związku z tym można przedstawić równanie ruchu bryły:

$$M\ddot{x} + k\dot{x} + G(x) = P \quad (2)$$

gdzie:

M – masa bryły (masa koła zębatego i wału),

P – siła docisku,

x – przemieszczenie,

\dot{x} – prędkość drgań,

\ddot{x} – przyspieszenie drgań,

$G(x)$ – funkcja zależna od przemieszczenia bryły x , odchyłek wykonawczych Δx , oraz zmiennej na odcinku przyporu sztywności sprężyny C .

$$G(X) = C_1 U_1 + C_2 U_2 \quad (3)$$

U_1 – ugięcie sprężyny 1,

U_2 – ugięcie sprężyny 2,

$$U_1 = x + \Delta x_1 \geq 0 \quad (4)$$

$$U_2 = x + \Delta x_2 \geq 0 \quad (5)$$

Δx – odchyłka wykonawcza w miejscu styku, czyli:

$$\frac{M\ddot{x}}{P} + 2\varphi \frac{M}{P} \dot{x} + \frac{U}{U_{st}} = 1 \quad (6)$$

gdzie:

U_{st} – statyczne ugięcie sprężyny pod działaniem siły P

$$U_{st} = U_1 + U_2 \quad (7)$$

Za pomocą równania 6 można modelować wpływ zużycia się zarysu zęba na sygnały diagnostyczne, w szczególności na wartość maksymalnych ugięć i odpowiadających im ekstremalnych wartości przyspieszeń kół.

Podsumowanie

Dla potrzeb systemu diagnostycznego trakcyjnego pojazdu szynowego celowe jest opracowanie modelu obliczeniowego (strukturalnego) wybranego pojazdu szynowego, który mógłby być traktowany jako model podstawowy. Model obliczeniowy może być skalą porównawczą dla modelu SWA (sygnałów wibroakustycznych) w wersji struktury ograniczonej do systemu diagnostycznego. Niniejszy artykuł stanowi zbiór ogólnych wytycznych do dalszych szczegółowych analiz konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych układów napędowych, a także pozwala na określenie funkcji budowanego systemu diagnostyki.

Bibliografia:

1. Chudzikiewicz A., Deuzkiewicz P., Radkowski S., *Wieloparametrowa diagnostyka wibroakustyczna stanu technicznego łożysk tocznych pojazdów szynowych*, „Napędy i Sterowanie” 2000, nr 5.
2. Madej J., *Mechanika napędu pojazdów szynowych z elektrycznymi silnikami trakcyjnymi*, PWN, Warszawa 1983.

3. Marciniak Z., *Ocena wpływu układu zawieszenia nadwozia na skuteczność biegu wagonu osobowego*, „Pojazdy Szynowe” 1976, nr 4.
4. Meinke P., *Laufzustands – und Streckenbewertung mit Entgleisungsdetektion. Ocena stanu własności dynamicznych i tras kolejowych za pomocą detekcji wykolejeń*, „ETR-Eisenbahntechn-Rundsch” 2007, Nr. 5.
5. Müller L., *Przekładnie zębate, badania*, WN-T, Warszawa 1984.
6. Müller R., *Veränderungen von Radlaufflächen im Betriebseinsatz und deren Auswirkungen auf das Fahrzeugverhalten (Teil 1)*, „ZRV+DET Glas. Ann.” 1998, Nr. 122.
7. OR-9892: *Mikroprocesorowy system diagnostyczny układu napędowego trakcyjnego pojazdu szynowego. Kryteria oceny sprawności. Prognozowanie stanów*.
8. OR-9988: *Mikroprocesorowy system diagnostyczny układu napędowego trakcyjnego pojazdu szynowego. Wytyczne do opracowania modelu systemu diagnostycznego*.
9. PTNB 01/2002: *Sprawozdanie z eksploatacji obserwowanej wagonów metra typu METROPOLIS 98B*, Metro Warszawskie, Warszawa 2002.
10. PTNB 01/2008: *Sprawozdanie z eksploatacji obserwowanej wagonów metra typu METROPOLIS 98B wyposażonych w koła monoblokowe wg rys. 455.0.153.000.22 produkcji BONATRANS a.s. BOHUMIN, IPS „Tabor” Poznań*, Metro Warszawskie, Warszawa-Poznań 2008.
11. SKF, *Railway technical handbook. Axleboxes, wheelset bearings, sensors, condition monitoring, subsystem and services*, PUB 42/P7 1098 EN-September 2010.
12. Sowa A., *Ocena stanu technicznego pojazdów szynowych na podstawie cech zdeterminowanych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013.
13. Szymaniec S., *Analiza drgań węzłów łożyskowych silników elektrycznych*, „Napędy i Sterowanie” 2009, nr 10.
14. Thiek M., Siegenthaler R., Sjöberg R., *Mechanische Drehgestellüberwachung mit Datenfernzugriff. Mechaniczny monitoring wózka ze zdalnym zbieraniem danych*, „ZEVrail Glasers Annalen” 2004, Nr. 11-12 (128).
15. Żółtowski B., *Podstawy Diagnostyki Maszyn*, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz 1996.

Autor:

mgr inż. **Radosław Miklasz** – Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor” w Poznaniu.

Diagnostic system of the drive system of rail vehicles

The diagnostic system of the drive system of railway vehicles with the special taking into consideration the diagnostic sensitivity of the system is discussed in this article. The guidelines to develop a diagnostic system of models are also given. This article was written as part of targeted projects: Forecasting the technical condition of the main systems of the rail vehicle on the basis of changes in the values of the characteristic parameters of subassemblies (N N509 336637) and Microprocessor diagnostic system of the main systems of the railway traction vehicle taking into account the current assessment and prediction of conditions (N R10 0048 06/2009) financed from the budget of the Ministry of Science and Higher Education.